

■ TEKNIIKAN ALA

LISÄÄVÄN VALMISTUKSEN KÄYTTÖ RAKENNUSALALLA

TILANNEKATSAUS 2017

TOIMITTANEET: Sami Lampinen ja Antti Alonen

Lisäävän valmistuksen käyttö rakennusalaalla

Tilannekatsaus 2017

Sami Lampinen
Antti Alonen

Savonia-ammattikorkeakoulu
PL 6
70201 KUOPIO
julkaisut@savonia.fi

Copyright © 2017 tekijät ja Savonia-ammattikorkeakoulu Oy

1. painos

Tämän teoksen kopioiminen on tekijänoikeuslain (404/61) ja tekijänoikeusasetuksen (574/95) mukaisesti kielletty lukuun ottamatta Suomen valtion ja Kopiosto ry:n tekemässä sopimuksessa tarkemmin määritellyä osittaista kopiointia opetustarkoituksiin. Teoksen muunlainen kopiointi tai tallentaminen digitaaliseen muotoon on ehdottomasti kielletty. Teoksen tai sen osan digitaalinen kopioiminen tai muuntelu on ehdottomasti kielletty.

ISBN 978-952-203-241-6 (nid.)
ISBN 978-952-203-242-3 (PDF)
ISSN 2343-5496
Savonia-ammattikorkeakoulun julkaisusarja 5/2017

Kustantaja: Savonia-ammattikorkeakoulu
Taitto: Tapio Aalto
Kansikuva: Sami Lampinen
Painopaikka: Kevama Oy, Kuopio 2017

SISÄLLYS

1 Johdanto	6
2 Lisäävä valmistus	8
2.1 Lisäävään valmistukseen liittyvät tekniikat	8
2.2 Lisäävän valmistuksen historiaa rakennusosalalla	11
2.3 Lisäävän valmistuksen hyödyt	12
2.4 Lisäävän valmistuksen haasteet	15
3 Betonin lisäävä valmistus	18
3.1 Valmistusmenetelmät	18
3.2 Betoni	24
3.3 Käyttökohteet	32
3.4 Lista alalla toimivista yrityksistä	33
3.5 Betonin lisäävän valmistuksen kehitysmahdollisuudet	47
4 Metallien lisäävä valmistus	50
4.1 Valmistusmenetelmät	50
4.2 Käyttökohteet	51
4.3 Esimerkkiyrityksiä ja -tapauksia	51
5 Muovien ja komposiittien lisäävä valmistus	56
5.1 Valmistusmenetelmät	56
5.2 Käyttökohteet	57
5.3 Esimerkkiyrityksiä ja -tapauksia	58
6 Maa-ainesten käyttö lisäävässä valmistuksessa (savi, hiekka, kipsi ym.)	62
6.1 Valmistusmenetelmät	62
6.2 Käyttökohteet	62
6.3 Esimerkkiyrityksiä ja -tapauksia	63
7 Muottien ja työkalujen valmistus	68
7.1 Hiekkamuotit	68
7.2 Betoniset muotit	70
7.3 Vahamuotit, muovimuotit ja silikonimuotit	70
7.4 Työkalut ja apuvälineet	72

8 Rakennussuunnittelu ja arkkitehtuuri	74
8.1 Pienoismallit	74
8.2 3D-kynät	76
8.3 Arkkitehtuuri	77
9 Yhteenveto	80
9.1 Nykyinen tilanne	80
9.2 Lähitulevaisuus (seuraavat 5 - 10 vuotta)	81
9.3 Tulevaisuus (seuraavat +10 vuotta)	83
10 Lähteet	85
10.1 Kuvalähteet	92

Alkusanat

Tämä julkaisu on toteutettu Savonia-ammattikorkeakoulun *Lisäävä Valmistus Pohjois-Savossa (LIVA)* -hankkeessa. Julkaisuun on kerätty tietoa eri lähteistä tilannekatsaukseksi siitä, missä rakennusalan lisäävä valmistus maailmalla tällä hetkellä menee, minkälaisia sovellus-alueita on käytössä ja mitkä ovat lähivuosien todennäköisimmät kehitysaskleet.

Lisäävä valmistus on muuttamassa perinteistä teollisuutta monilta osin, eikä rakennusteollisuus ole tästä poikkeus. Toimiala on varsinakin Suomessa hyvin konservatiivista ja sillä on tiettyjä erityispiirteitä, jotka hidastavat valmistusmenetelmän käyttöönottoa samalla nopeudella kuin muilla teollisuudenaloilla. On kuitenkin väistämätöntä, että lisäävän valmistuksen käyttö tulee myös rakennusosalalla muuttamaan toimintatapoja sekä murtamaan vanhoja ajatusmalleja.

Tilannekatsauksen kirjoittamisen aikana on käynyt selväksi, että valmistusmenetelmän hyödyntäminen rakennusosalalla on vasta alkutekijöissään ja menee vielä useita vuosia ennen menetelmän laajamittaista hyödyntämistä. Maailmalta löytyy kuitenkin jo lupaavia käyttökohteita jotka tulevat yleistymään lähitulevaisuudessa.

Julkaisua luettaessa on luonnollisesti huomioitava teknologian kehitysvaihe. Kaikkien valmistajien lupauksia esimerkiksi tulostusnopeuksista ei ole vielä esitetty toteen käytännön esimerkeillä.

Useat niistä sovelluskohteista, jotka toimivat muussa teollisuudessa (esim. autoteollisuus, kappale-tavarateollisuus) toimivat todennäköisesti myös rakennusosalalla. Näitä ovat mm. erikoistyykalujen valmistus ja perinteisen valmistuksena tukena toimivien tyykalujen sekä muot-tien valmistus.

1 Johdanto

Lisäävä valmistus (*Additive Manufacturing, AM*) eli 3D-tulostus on valmistusmenetelmä, jolla on runsaasti käyttö- ja sovelluskohteita eri teollisuuden aloilla. Tällä hetkellä näkyvimmin lisäävää valmistusta hyödyntäviä aloja ovat ilmailu- ja avaruusala, autoteollisuus ja terveydenhuolto ja lääketiede. Valmistusmenetelmän käyttöä valmistavassa teollisuudessa hyödynnetään vuosi vuodelta enemmän ja sitä pidetäänkin tärkeänä osana seuraavaa teollista vallankumousta. Lisäävä valmistus on tullut yhä enemmän esille myös rakennusteollisuudessa.

Tämän julkaisun tarkoituksena on luoda yleiskuva lisäävän valmistuksen sovelluksista, käyttökohteista ja materiaaleista rakennusosalalla. Julkaisussa selvitetään nykyistä tilannetta valmistusmenetelmän käytöstä maailmalla ja Suomessa, sekä pohditaan 3D-tulostuksen tulevaisuuden näkymiä ja visioita rakennusosalalla.

Lisäävä valmistus on valmistusmenetelmä, jossa yhdistetään materiaalia 3-ulotteisen digitaalisen mallin mukaan, yleensä kerros kerrokselta. Lisäävä valmistus on lähtöisin 1980-luvulta, jolloin sitä käytettiin lähinnä tuotteiden prototyyppien valmistukseen. Prototyyppien tulostus on vieläkin yksi valmistusmenetelmän yleisimmistä käyttökohteista. [1, s.5]

Mitä lisäävä valmistus tarkoittaa rakennusosalalle?

Muilta teollisuudenaloilta löytyy konkreettisia esimerkkejä siitä, miten lisäävän valmistuksen käyttöönotto voi mullistaa koko toimialaa. Esimerkiksi kuulolaitteiden valmistuksessa valmistusmenetelmän käytöstä oli niin merkittäviä etuja, että käytännössä koko toimiala siirtyi muutamassa vuodessa lisäävän valmistuksen käyttöön. Lisäävän valmistuksen maailmanlaajuinen kertyvä vuotuinen kasvuprosentti (CAGR) on viimeisen neljän vuoden ajalta 28 % ja vuoden 2016 osalta nopeimmin kasvava osa-alue oli lopputuotteiden valmistus. [107]

Rakennusteollisuudessa arkkitehdit ovat käyttäneet lisäävää valmistusta hyödyksi pienoismallien valmistuksessa jo pitkään. Viime vuosiin saakka käyttökohteet ovat olleet pienikokoisia, koska pienten 3D-tulostimien rakentaminen on ollut helpompaa ja halvempaa. Val-

mistusmenetelmä on kehittynyt viimeisen kymmenen vuoden aikana nopeasti ja onnistuneet käyttöesimerkit ovat lisänneet kiinnostusta alaan. Nopeaa kehitystä on vauhdittanut suuret investoinnit, joita valtiot ja kansainväliset suuryritykset ovat alan parissa tehneet. Kehitys on tuonut mukanaan uusia valmistusmenetelmiä ja materiaaleja sekä kasvattanut tulostusalueen kokoa pöytäkokoisista pienosien tulostimista useiden metrien kokoisiin tuotantojärjestelmiin.

Voiko rakennuksia tai sen osia tulostaa?

Kysymys on askarruttanut rakentamisen asiantuntijoita valmistusmenetelmän yleistymisestä lähtien. Rakennusten iso kokoluokka tekee lisäävän valmistuksen käytöstä vaikeampaa ja kalliimpaa. Rakennusten tulostaminen vaatii suuren kokoluokan tulostimen ja rakentamiseen soveltuvien tulostusmateriaalien tutkimista.

Rakennukset koostuvat useasta erilaisesta rakennusosasta, joilla on eri käyttötarkoituksia, sekä useasta erilaisesta materiaalista, joilla on erilaisia ominaisuuksia. Rakennusta ei voida ajatella valmistettavan yhdestä ainoasta materiaalista yhdellä ainoalla ”tulostinlaitteella”. Rakennuksen lisäävä valmistus ei siis yleensä käsitä koko rakennuksen tulostamista.

Samoin kuin valmistavan teollisuuden puolellakin, osa rakennusosista ja työvaiheista on tulevaisuudessakin kannattavaa valmistaa perinteisillä menetelmillä. Lisäävä valmistus tulee rakentamisessa perinteisen rakentamisen rinnalle lisämenetelmänä, eikä korvaa kokonaan perinteisiä rakentamisen keinoja. Käyttökohteita on viimeisten vuosien varrella ilmaantunut useita, ja mikäli kehitys noudattaa rakennusosalalla samaa kaavaa kuin muilla teollisuudenaloilla, tulee sovelluskohteiden määrä nousemaan kiihtyvällä tahdilla jo seuraavan viiden vuoden aikana.

2 Lisäävä valmistus

Lisäävä valmistus (*Additive manufacturing*) on virallinen termi, jota käytetään kaikissa tähän valmistusmenetelmään liittyvissä sovelluksissa. Se on määritelty prosessiksi, joka yhdistää materiaalia perustuen 3-ulotteiseen digitaaliseen malliin (3D-malliin), yleensä kerros kerrokselta.

On olemassa myös valmistusprosesseja, jotka yhdistävät materiaalia kerros kerrokselta kuten lisäävässä valmistuksessa, mutta eivät hyödynnä 3D-mallia kappaleen valmistuksessa. Koska niistä puuttuu 3D-mallin tuoma tavoitetila ja ”valmistuksen äly”, ei niitä tässä katsauksessa lasketa lisäävän valmistuksen piiriin.

2.1 Lisäävään valmistukseen liittyvät tekniikat

3D-mallinnus

Ensimmäiset 3D-mallinnukset tehtiin jo 1960-luvulla ja 1980-luvulla alkoi CAD-ohjelmien kehitys tietokonepohjaiseen suunnitteluun. Mallinnusohjelmat ovat kehittyneet ja yleistyneet samaa vauhtia tietotekniikan yleisen kehityksen kanssa. Suomessa 1990-luvun aikana suunnittelu muuttui pääasiassa 2D-piirtämiseksi CAD-ohjelmilla. 3D-mallinnus ja tietomallinnus syrjäyttivät 2D-piirtämisen 2000-luvulla. [2, s.12–15] Erityisesti viime vuosikymmenen vaihteessa 3D-mallinnus ja tietomallinnus ovat tulleet yleiseksi suunnittelutavaksi rakennusala.

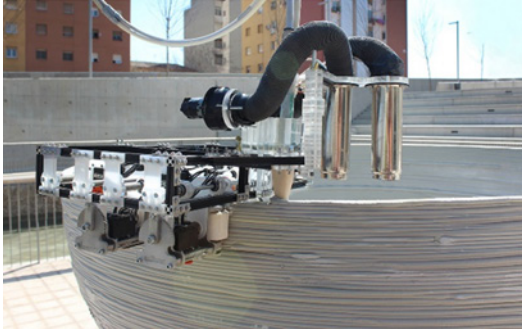
Robotiikka

Robottien hyödyntäminen rakennusala on vielä vähäistä. Rakentamiseen on kehitetty esim. purkurobotteja, jotka ovat jo yleisesti käytössä suurissa purkukohteissa. Lisäksi viime aikoina on kehitetty muurausrobotteja, mutta niitä on käytetty vasta muutamilla työmailla USA:ssa.

Robotiikka ja automatisointi ovat olennainen osa lisäävää valmistusta. Teollisuusroboteilla voidaan liikuttaa tulostuspäätä ohjelmoitua tai

koodattua reittiä pitkin. Maailmalta löytyy useita esimerkkejä yrityksistä ja tutkimuslaitoksista, jotka ovat asentaneet teollisuudessa yleisesti käytössä oleviin käsivarsirobotteihin betonin tulostuspäitä.

Betonin 3D-tulostus ei kuitenkaan edellytä aina yhtä teollisuusrobotia ja tulostuspäätä – myös vaihtoehtoisia ratkaisuja tutkitaan. IAAC –yliopiston kehittämässä valmistusmenetelmässä betonin tulostuksen hoitavat kolme pientä robottia.



Kuva 1. IAAC minirobotti.



Kuva 2. KUKA-robottikäsivarsi tulostaa savea.

Kuten aiemmin mainittiinkin, Kaikkien osien valmistus ei ole mahdollista tai kannattavaa lisäävän valmistuksen menetelmillä. Lisäävä valmistus voidaan toteuttaa niin, että sen yhteydessä valmistettavaan kohteeseen tai kappaleeseen lisätään muita komponentteja robottien avulla. Kehittyneimmissä valmistusmenetelmissä betonin tulostuksen yhteydessä robotit lisäävät betoniin raudoituksia. Raudoitusten lisäksi roboteilla voidaan lisätä esim. aukonylityspalkkeja tai sähköpistokerasioita.

Sveitsissä ETH Zurichin tutkimuslaitoksella on kehitetty robotiikka-tekniikkaa *RTC (Robotic Timber Construction)*, jonka avulla voidaan valmistaa puurakenteita. Robotti katkaisee sahatavaran sirkelillä, asentaa sahatavaran paikoilleen robottikäsivarrella ja kiinnittää rakenteet naulaimilla. Kehitysprojekti on alkanut vuonna 2008 ja tekniikkaa on kokeiltu jo käytännön kohteissa. [110]

ETH Zurich kokeili tekniikkaa ensimmäisen teollisen täysimittaisen toteutuksen avulla vuonna 2010. ”*Sequential Roof*” -projektissa valmistettiin riiputettu alakatto uuteen rakennukseen ETH Zurichin ark-

kitehtuurin ja tekniikan tutkimuslaitokselle. Riiputettuun alakattoon käytettiin 48624 rimaa, joiden pituus oli enintään 3,17 m. 2308 neliömetrin suuruinen katto valmistettiin automaattisesti robotin avulla ja robotti kokosi rakenteet hyödyntäen 3D-mallia. [110]



Kuva 3. Robotti asentaa ja kiinnittää sahatavaraa automaattisesti.



Kuva 4. ”Sequential Roof” -projekti valmiina.

Liukuvalu

Liukuvalua voidaan ajatella betonin lisäävän valmistuksen esiasiteeksi. Liukuvalutekniikkaa on kehitetty jo 1940-luvulla [3].

Liukuvalulla tarkoitetaan betonin jatkuvaa valamista liikkuvalla muotilla, niin ettei tuoreen ja kuivuvan betonin väliin synny rajoja. Muottia liikutetaan ylöspäin tai eteenpäin samanaikaisesti betonia valaen. Betonin täytyy olla tarpeeksi nopeasti kuivuvaa, jotta se on tarpeeksi kovaa tullessaan muotista ulos. Toisaalta betonin tulee myös olla muotin toisessa päässä tarpeeksi työstettävää. Liukuvalut voidaan jakaa pystyvaluihin ja vaakavaluihin.



Kuva 5. Liukuvaluna tehty pystyvalu.

Pystyvaluina on tehty esim. suuria ja korkeita siiloja, piippuja, hormoneja, hissikuiluja ja muita korkeita rakennelmia. Suurissa pystysuuntaisissa liukuvaluissa muotit ovat suuria ja niihin sisältyy työskentelytasot, suojakaiteet ym. Pystyvaluissa muottia ja työskentelytasoa nostetaan yleensä suurilla hydraulisilla tunkeilla [3]. Muotin nostonopeus riippuu paljon muotin korkeudesta. Muottia nostetaan siihen tahtiin, kun betoni kovettuu muotin alaosassa. Pystyvalussa kovettuneen betoni täytyy kestää hyvin päälle valettavan betonin paino ja valupaine.

Vaakavaluja käytetään paljon infrarakentamisessa tien reunakivien, betonikaiteiden ja kävelyteiden valussa. Vaakavaluja tehdään yleensä liikkuvilla valukoneilla. Valukoneet on suunniteltu yleensä tiettyä valua varten esim. tien reunakivien valamiseen.



Kuva 6. Tien reunakiven vaakasuuntaisen liukuvalu.

Perinteistä liukuvalua ei kuitenkaan voida pitää lisäävän valmistuksen menetelmänä, koska se ei perustu 3-ulotteisen digitaalisen mallin hyödyntämiseen. Liukuvalutekniikasta voidaan kuitenkin kehittää lisäävän valmistuksen menetelmä lisäämällä siihen automatisointia ja/tai muuta digitalisoinnin tuomaa älyä.

2.2 Lisäävän valmistuksen historiaa rakennusallalla

Ensimmäiset rakennusten 3D-tulostuksen kokeet ja tutkimukset on tehnyt professori Behrokh Khoshnevis Etelä-Kalifornian yliopistossa 1990-luvun keskivaiheella [4, s.1]. Behrokh Khoshnevis kehitti betonin tulostusmenetelmää ja siihen pohjautuvaa uutta rakennustapaa. Behrokh nimesi tulostustekniikkansa nimellä ”*Contour crafting*” ja perusti myöhemmin yrityksen samalla nimellä.

Kiinalainen yritys Winsun alkoi kehittää vuonna 2004 samanlaista 3D-tulostustekniikkaa ja on sittemmin ottanut merkittäviä edistysaskeleita betonin tulostuksessa. [5]

Italialainen Enrico Dini puolestaan lähti kehittämään sidosaineruiskutusmenetelmään perustuvaa tekniikkaa. Enrico nimesi yrityksensä

ja tekniikan nimellä *D-Shape*. Yritys teki ensimmäiset koetulostukset vuonna 2007. [6]

Muihin lisäävän valmistuksen menetelmiin verrattuna rakennusalan 3D-tulostuksen kehitys on ollut melko hidasta vuoteen 2012 asti. Vuoden 2012 jälkeen kehitys on nopeutunut erityisesti Euroopassa, ja alan tutkimusta ovat vieneet eteenpäin yhä useammat yritykset, tutkimuslaitokset ja yliopistot. [7] Betonin lisäksi on tutkittu myös muiden lisäävään valmistukseen soveltuvien materiaalien käyttöä rakennusteollisuudessa. Esimerkkejä muista materiaaleista ovat metallit, muovit, komposiitit, savi, hiekka ja muut maa-ainekset. Lisäksi automatisoitua puurakenteiden lisäävää valmistusta on kehitetty Sveitsissä. [110] Lisäävän valmistuksen kehitystä on vauhdittanut robotiikan ja automatisoinnin kehitys sekä 3D-mallinnuksen ja digitalisoinnin kehittyminen rakennusalan käyttöön.

Lisäävän valmistuksen käyttö rakennusteollisuudessa on tällä hetkellä kiivaassa kehityksessä, mutta vielä selvästi alkutekijöissään.

2.3 Lisäävän valmistuksen hyödyt

Suunnittelu

Lisäävässä valmistuksessa on suora yhteys 3D-mallin ja valmistuksen välillä. Suunnittelu voi vapautua, kun kaarevat seinät ovat yhtä halpoja valmistaa kuin suorat seinät. Suunnittelua ei myöskään rajoita materiaaleista johtuvat moduulimitoitukset (esim. harkot). Suunnitteluvaiheet voivat nopeutua huomattavasti hyödyntämällä parametrisiä 3D-malleja.

Geometrian vapaus

Monimutkainen geometria ei juurikaan lisää kustannuksia tai valmistusaikaa. Yksityiskohtia voi olla melkein rajattomasti. Muotoa eivät rajoita työstökoneiden ja muottien rajoitukset joten lisäävä valmistus mahdollistaa kappaleet joiden valmistaminen ei perinteisillä menetelmillä onnistu. Lisäävä valmistus voi muuttaa arkkitehtuuria enemmän yksilölliseen suuntaan.

Rakenteiden optimointi

Lisäävä valmistus mahdollistaa rakenteiden optimoinnin. Rakenteista voidaan tehdä kevyempiä, vahvempia ja monimutkaisempia. Topologian optimoinnilla tarkoitetaan suunnitteluvaihetta, jossa FEM-laskennan avulla suunnitellaan automaattisesti rakenteiden optimaaliset ainevahvuudet, jotta paras lujuus ja keveys saadaan aikaiseksi. Liitosten määrää voidaan vähentää, kun usean kappaleen kokoonpanot voidaan valmistaa yhtenä, monimuotoisempana kappaleena. Käsitteet perinteisistä rakennusosista voivat muuttua, kun ennen erillisinä käsitetyt rakennusosat sulautuvat yhdeksi yhtenäiseksi osaksi.

Nopeus

Lisäävä valmistus on tunnettu aiemmin myös nimellä ”pikavalmistus”, jolla kuvattiin yhtä valmistusmenetelmän tärkeää ominaisuutta. Lisäävä valmistus mahdollistaa merkittävästi nopeamman tuotannon jo nykyisellä teknologialla. Esimerkiksi Apis Cor -yritys lupaa jopa 6 kertaa nopeampaa seinän rakentamista tavalliseen harkkoseinään verrattuna [35]. Nopeuteen vaikuttaa olennaisesti myös se, että lisäävässä valmistuksessa on vähemmän työvaiheita kuin perinteisissä valmistusmenetelmissä.

Työkalut ja varastointi

Lisäävä valmistus vähentää perinteisten työkalujen ja työkoneiden tarvetta. Väliaikaisia muotteja ei tarvitse tehdä. Varastoinnin tarve pienenee, kun rakennusosat voidaan tuottaa juuri oikeaan aikaan tehtaalla tai suoraan työmaalla. Lisäävällä valmistuksella voidaan myös tuottaa tarvittavia työkaluja ja varaosia, räätälöityinä kyseiseen tarpeeseen.

Automatisointi

Lisäävä valmistus vähentää työvoiman ja raskaan käsin tehtävän työn tarvetta. Rakentaminen voidaan automatisoida tulostimien ja robotiikan avulla. 3D-tulostimet voivat toimia kellon ympäri 24 tuntia vuorokaudessa. Työmiehiä tarvitaan jatkossakin, mutta työnkuva muuttuu 3D-tulostinten ja robottien operointiin ja suunnittelutyöhön. Työturvallisuus parantuu, kun automaatio hoitaa raskaita ja vaarallisia työvaiheita.

Sarjatuotantoa voi varioida

Lisäävällä valmistuksella voidaan valmistaa periaatteessa ääretön määrä erilaisia rakennusosia ilman asetusten tai työkalujen muutoksia. Jokaisesta rakennusosasta voidaan tuottaa helposti variaatioita muuttamatta valmistusmenetelmiä. Tärkeänä ominaisuutena on myös viime hetken muutosten mahdollisuus ennen tuotantoa.

Materiaalimenekki

Perinteisessä rakentamisessa käytetään yleensä materiaalilisää n. 5-20 % riippuen materiaalista ja työtavasta [8]. Perinteiset rakentamismenetelmät poistavat materiaalia ja tuottavat usein hukkamateriaalia. Yhtenä lisäävän valmistuksen eduista on se, että koska materiaalia lisätään kerros kerrokselta, hukkamateriaalia syntyy hyvin vähän tai jossain tapauksissa ei ollenkaan. Materiaalimenekki on pienempää myös siitä syystä, että esimerkiksi muotien tarve on vähäistä.

Halvempi tuotanto

Vähentynyt materiaalihukka, nopeampi tuotanto, pienempi työvoiman tarve, vähentynyt logistiikka ja varastointi voivat johtaa merkittäviin kustannussäästöihin.

Ympäristöystävällisyys

Vähäinen materiaalihukka vähentää rakentamisestasyntyviä jätteitä ja tarvittavaa logistiikkaa. Lisäävässä valmistuksessa voidaan myös hyödyntää kierrätettyjä materiaaleja. Tarvittavien varaosien ja kokonaisuuksien valmistaminen kilpailukyiseen hintaan parantaa huollettavuutta ja lisää käyttöikää.

2.4 Lisäävän valmistuksen haasteet

Suunnittelu

Suunnittelussa on huomioitava monia uusia asioita kuten tulostustekniikka, tulostussuunta ja sen vaikutukset sekä kappaleen tulostettavuus. Tämä vaatii uutta ajattelutapaa suunnitteluun sekä lisää suunnittelun määrää ja sen tärkeyttä. Suunnitelmat on luonnollisesti tehtävä 3D-mallintamalla. Nykyaikana 3D-mallinnus on rakentamisessa yleisesti käytössä, mutta ohjelmien yhteensopivuudessa tulostuksessa käytettyihin ohjelmiin on vielä kehitettävää. CAD-ohjelmien kyky luoda monimuotoisia geometrioita on vielä haasteellista ja vaatii suunnittelijalta osaamista. Lisäksi tulevaisuudessa monimateriaalitulostus tuo lisää haasteita suunnitteluun.

Rakennusmääräykset

Tulostettujen rakennusosien tulee täyttää niille asetetut rakennusmääräykset, jotta niitä voitaisiin käyttää rakennuksissa. Jotta rakennusmääräykset voitaisiin täyttää, tulisi rakennusosien ja -materiaalien ominaisuuksia ja toimivuutta testata ja todistaa. Lisäksi valmistusprosessit vaatisivat standardeja ja suunnitteluohjeita. Erityisesti kantavan rungon osissa tulostetuille rakennusosille pitäisi määrittää rakennesuunnittelussa ja laskennassa käytettävät

mitoitusarvot ja suunnitteluun vaikuttavat tekijät. Lisäksi määräykset CE-merkittyjen rakennustuotteiden käytöstä vaikeuttavat lisäävän valmistuksen käyttöä rakentamisessa.

Laadunvarmistus

Useassa lisäävän valmistuksen menetelmässä on vielä kehitettävää laadun suhteen, sillä kappaleiden laatu ei ole aina tasalaatuista useita kappaleita valmistettaessa. Laadunvarmistus vaatisi menetelmien ja ohjeiden laatimista. Laadunvalvonnassa on myös omat mahdollisuudet ja haasteet. Lisäävän valmistuksessa kerätään tulostusprosessin aikana erilaista dataa ja prosessiparametrejä. Valmistusta voitaisiin valvoa ja laatu varmistaa jälkikäteen käytettyjen koodien ja mittalaitteiden tallentamien arvojen avulla.

Rakennusten suuri koko

Rakennusten suuri koko tekee lisäävän valmistuksen hyödyntämisestä haasteellista. Osassa menetelmistä tekniikan skaalaus suuremmaksi on vaikeampaa kuin toisissa eikä kaikkia lisäävän valmistuksen menetelmiä ole välttämättä edes järkevää käyttää suuremmassa mittakaavassa. Suurten tulostimien rakentaminen vaatii enemmän aikaa ja rahaa. Suurissa kappaleissa lujuusominaisuudet tulevat tärkeiksi sekä haasteellisiksi.

Rajalliset materiaalit

Tulostettavissa olevia materiaaleja on rajallinen määrä, sillä kaikki perinteiset rakennusmateriaalit eivät suoraan sovellu lisäävään valmistukseen. Monimateriaalitulostus on vielä haastavaa, mutta se toisi rakentamisessa monia mahdollisuuksia.

Valmistusmenetelmien rajoitukset

Myös lisäävän valmistuksen menetelmissä on menetelmäkohtaisia haasteita ja rajoit-

teita. Osassa menetelmistä on haasteena esim. tulostussuuntaan nähden negatiiviset pinnat tai rajalliset materiaalivaihtoehtot. Melkein kaikissa menetelmissä on haasteena kerrosmainen rakenne ja sen vaikutus rakenteellisiin ominaisuuksiin.

Koulutus

Lisäävä valmistus on vielä niin uusi osa-alue rakennusosalalla, että ammattitaito on harvinaista. Valmistusmenetelmän käyttö vaatii uudenlaista suunnittelijoiden ja rakentajien koulutusta perusopetukseen ja täydennyskoulutukseen. Tällä hetkellä valmistusmenetelmän opetus oppilaitoksissa niin Suomessa kuin maailmalla on harvinaista.

Investointitarpeet

Uusi tekniikka ja uudet koneet vaativat lisää investointeja alalle. Investointien lisäksi vaaditaan useiden vuosien tutkimus- ja kehitystyötä, ennenkuin lisäävää valmistusta voidaan käyttää rakennusten valmistamisessa.

3 Betonin lisäävä valmistus

Betoni on yksi tärkeimmistä ja käytetyimmistä rakennusmateriaaleista. Betoni tunnetaan materiaalina hyvin ja sen ominaisuuksia on tutkittu pitkään. Betonin ominaisuudet ovat hyvin muokattavissa ja sitä on saatavilla useaa erilaista laatua. Uusia kehittyneempiä betoneja on tullut markkinoille, kuten kovalujuus-, kuitu- ja geopolymeeribetonit.

Betoni soveltuu materiaaliksi osaan lisäävän valmistuksen prosesseista, mutta sen käyttäminen on vielä kehitysvaiheessa. Betonin käyttäminen onnistuneesti lisäävän valmistuksen materiaalina vaatii ominaisuuksien muokkaamista ja materiaalitutkimusta.

3.1 Valmistusmenetelmät

Betonin tulostuksessa on käytössä pääasiassa kaksi menetelmää: materiaalin pursotus ja sidosaineruiskutusmenetelmä. Näiden lisäksi liukuvalusta on kehitetty uudenlaista menetelmää, jonka voidaan katsoa olevan luonteeltaan ja toiminnaltaan lisäävää valmistusta. Lisäksi betonia voidaan tulostaa myös yhdistämällä edellä mainittuja menetelmiä keskenään.

Rakentamisessa pelkkä betonin 3D-tulostus ei yleensä riitä, vaan sen käytössä tarvitaan myös muita lujiteratkaisuja kuten raudoitusten asennusta. Kehittyneimpiin valmistusmenetelmiin onkin lisätty robotiikkaa asentamaan esim. raudoituksia. Valmistusmenetelmät voidaan jakaa toimintatavan lisäksi rakennuspaikalla tehtävään tulostukseen ja tehtaalla tehtävään tulostukseen.

Betonin pursotus

Pursotus on tällä hetkellä yleisimmin käytössä oleva menetelmä betonin tulostukseen. Menetelmässä betonia pursotetaan suuttimen kautta kerros kerrokselta ja kerroksen paksuutta ja leveyttä voidaan säätää suuttimen suuaukon kokoa muuttamalla. ulostus tapahtuu aina aiemman kerroksen päälle, joten aukkojen ja ulokkeiden tulostus ei ole mahdollista ilman tuentaa. Betonin tulee olla tarpeeksi kiinteässä muodossa ja kovettua tarpeeksi nopeasti, jotta se pysyy muodossaan ja

kestää päälle tulevien kerrosten painon. Tämä vaatii betonin koostumuksen ja ominaisuuksien tarkkaa säätämistä, sekä tulostusnopeuden sovittamista tulostuksen koon ja muodon mukaan.

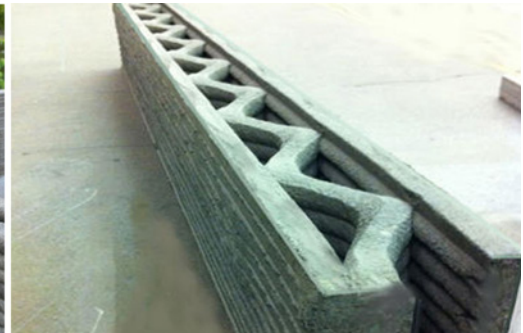
Pursotuksesta jää jäljelle kerroksellinen rakenne. Osa tulostimista tasoittaa ulkopinnan siistiksi tulostuksen aikana automaattisesti. Tulostuksen tarkkuus riippuu paljon suuttimen koosta ja kerroksen paksuudesta. Pursotuksessa tarkkuus ja pinnanlaatu ovat yleensä heikkoja esim. nurkat jäävät usein pyöreiksi. Pinta voi tarvita joko automaattisesti tai manuaalisesti tehtävää tasoitusta tulostuksen jälkeen.

Edellä mainittujen ominaisuuksien lisäksi pursotusmenetelmässä on myös valmistusta rajoittavia tekijöitä. Kaikenlaisen geometrian tulostus ei ole täysin vapaata, koska valmistussuuntaan nähden negatiivisten pintojen tulostus ei ole mahdollista ilman tukirakenteita tai tukimateriaalia.

Tästä johtuen tulostussuunta täytyy ottaa huomioon jo suunnitteluvaiheessa, jotta kappale on ylipäättään tulostettavissa. Tulostuksen suunta ja kerrosmainen rakenne vaikuttavat myös rakenteen kestävyYTEEN ja lujuuteen. Nykyisissä laitteissa pienten yksityiskohtien tulostus on rajallista. Tulostimen suuttimen suuaukon koko ja muoto vaikuttavat yksityiskohtien tulostettavuuteen, mutta pienemmällä suuaukon koolla tulostus on hitaampaa.



Kuva 7. Total Kustomin pursottava tulostuspää.



Kuva 8. Tyypillinen pursottamalla tulostettu seinärakenne (Contour crafting).

Sidosaineruiskutusmenetelmä

Sidosaineruiskutusmenetelmässä (*Binder jetting*) nestemäistä sidosainetta ruiskutetaan valikoivasti jauhekerrokseen. Ruiskutuksen jälkeen uusi kerros jauhetta levitetään edellisen päälle ja uusi ruiskutus voi alkaa. Kerroksen paksuus voi olla jauheesta riippuen hyvinkin ohut. Jauhekerros eli jauhepeti toimii alustana ja tukena seuraavalle kerrokselle. Sidosaine voi olla myös jauheessa ja ruiskutettava neste toimii sidosaineen aktivoivana aineena. Tulostuksen jälkeen ylimääräinen jauhe poistetaan ja voidaan käyttää hyödyksi uudelleen.

Sidosaineruiskutusmenetelmässä käytetään yleensä hiekkaa, kipsiä tai keraamisia jauheita. D-Shape käyttää valmistusmenetelmässään jauheena hiekkaa, jossa on metallioksidea ja sidosaineena klooripohjaista nestettä. Tuloksena syntyy hiekkakiven kaltaista materiaalia. [6]

Emerging objects puolestaan käyttää sementtipolymeeriä jauheena ja jauheessa voidaan käyttää myös kuituja betonin vahvistuksena. [10] Australialainen Swinburnen teknillinen yliopisto on tutkinut ja valmistanut geopolymeeribetonia sidosaineruiskutusmenetelmällä. [111]

Menetelmän etuna on täysi geometrian vapaus, koska jauhepeti toimii tukena tulostussuuntaan nähden negatiivisille pinnoille. Menetelmällä voidaan tehdä myös hyvin tarkkaa jälkeä ja pieniä yksityiskohtia materiaalista riippuen. Menetelmällä on siis mahdollista tehdä aivan uudenlaista arkkitehtuuria. Sitä voidaan käyttää myös korjausrakentamisessa restaurointi- ja rekonstruointikohteissa.

Menetelmän huono puoli on suuri jälkityö irtoaineen poistamisessa ja pintojen puhdistuksessa. Jauheen levitys ja poisto tekevät menetelmästä hitaan. Sidosaineruiskutusmenetelmän tulostusalue on kokuokaltaan yleensä pienempi kuin suurissa pursotusmenetelmän tulostimissa. Yksi suurimmista tulostusalueista on kokoa 6 x 6m [6]. Menetelmä on työläs varsinkin suurissa tulostuksissa, joissa jää paljon ylimäärästä irtoainesta.

Irtoaine on lisäksi työturvallisuusriski, koska se on hyvin hienorakeista ja pölyää helposti. Irtoainetta poistaessa on suojauduttava ja käytettävä hengityssuojainta. Menetelmä ei ole siis käytännöllinen eikä taloudellinen kokonaisten rakennusten tulostuksessa vaan soveltuu parhaiten monimuotoisten rakennusosien tulostukseen.



Kuva 9. D-shapen 3D-tulostin ja ensimmäisiä tulostuksia.

Yhdistelmämenetelmä

Lontoossa sijaitsevan Bartlettin oppilaitoksen (*The Bartlett School of Architecture*) opiskelijat ovat tutkineet ”*Fossilised*”-projektissaan menetelmää, jossa yhdistetään edellämainitut pursotusmenetelmä sekä sidosaineruiskutusmenetelmä.

Menetelmässä pursotetaan betonia jauhepedin päälle. Betonin pursotus tapahtuu tavallisella pursotustekniikalla, tosin suuttimen pää on hieman tavallista pienempi. Pursotuksen jälkeen levitetään jauhe, jonka tarkoituksena on toimia tukimateriaalina seuraavalle tulostettavalle kerrokselle. Tähän mennessä julkaistun materiaalin perusteella jauhe levitettiin käsin, mutta menetelmän jatkokehityk-



Kuva 10. Bartlettin yhdistelmämenetelmä.

sessä jauheen levitys olisi mahdollista automatisoida. Kun kerros jauhetta on levitetty, uuden kerroksen pursotus voi alkaa. [12] [13]

Menetelmässä yhdistyvät kahden tekniikan hyödyt ja haitat. Pursotusmenetelmässä betonimassa sekoitetaan jo valmiiksi, mikä tekee sen käsittelystä helpompaa. Se on myös menetelmänä yksinkertaisempi kuin sidosaineruiskutusmenetelmä.

Jauhepedistä on taas hyötyä vapaiden geometrioiden valmistuksessa, koska jauhepeti tukee tulostussuuntaan nähden negatiivisia pintoja. Jauhepeti tekee menetelmästä kuitenkin työläämmän ja hitaamman erityisesti suurien kappaleiden valmistuksesta.

Yhdistelmämenetelmä on toistaiseksi tutkimusvaiheessa, eikä sen jälki ja tarkkuus ole samalla tasolla sidosaineruiskutusmenetelmän kanssa. Jatkokehityksessä on tarkoitus mahdollistaa useiden eri materiaalien käyttäminen sekä yhdistää tukimateriaalin syöttäminen pursottavaan tulostuspäähän. Menetelmällä voi olla kuitenkin käyttökohteita erikoisten arkkitehtuuristen muotojen valmistuksessa.



Kuva 11. Yhdistelmämenetelmän tulostusjälkeä.

Liukuvalu ja robotiikka

Liukuvalu voidaan laskea lisäävän valmistuksen menetelmäksi, kun siihen lisätään automatisointi ja 3D-mallin hyödyntäminen. Sveitsissä ETH Zurich, NCCR (*The National Centre of Competence in Research*) on kehittänyt liukuvalusta uudenlaista tekniikkaa SDC (*Smart Dynamic Casting*), joka perustuu robotin tekemään liukuvaluun 3D-mallin avulla. [15]

Menetelmässä teollinen robottikäsivarsi nostaa muottia mallinnettua ja ohjelmoitua reittiä pitkin. Muottia voidaan kierittää tai liikuttaa sivuttaissuuntiin, kun sitä samanaikaisesti nostetaan. Muotti voi myös muuttaa muotoaan noston aikana. NCCR on testannut menetelmällä monimuotoisten pilarien valmistusta. [14] Menetelmällä saadaan tehtyä saumaton ja siisti valupinta. Rakenteeseen ei jää kerroksellista rakennetta niin kuin betonin pursotusmenetelmässä mahdollistaen paremmat materiaaliominaisuudet. Huonona puolena on geometriaa rajoittavat tekijät kuten valusuunta ja muotin leveys.



Kuvat 12 ja 13. SDC-tekniikalla valmistetaan kierteisiä pilareita.

Tulostusympäristö (Rakennuspaikalla/tehtaalla)

Lisäävän valmistuksen menetelmistä on paljon erilaisia variaatioita. Osa yrityksistä on keskittynyt tehdasvalmistettujen rakennusosien ja elementtien lisäävään valmistukseen, osa taas on keskittynyt rakennusten valmistukseen suoraan rakennuspaikalla. Tulostusympäristö on vaikuttanut tulostimien suunnitteluun ja tulostustekniikkaan. Rakennuspaikalla tulostus vaatii, että tulostin on helposti kuljetettava, asennettava ja koottava. Tehtaassa tulostimet voivat olla kiinteästi asennettuja halliin. Tehtaassa tulostimet voivat olla suurempia ja tulostusalue suurempi. Toisaalta rakennuspaikan tulostin voi olla siirrettävissä tai liikkuva, jolloin tulostusalue voi olla teoriassa rajaton. Tehtaassa tulostetaan osia ja elementtejä, jotka kuljetetaan ja kasataan myöhemmin rakennuspaikalla. Rakennuspaikalla voidaan tulostaa kokonaista rakennuksen runkoa.

Rakennuspaikalla tehtävä 3D-tulostus voidaan jakaa kahdenlaiseen tulostustapaan:

1. tulostus tapahtuu rakennuksen ulkopuolelta ja
2. tulostus tapahtuu rakennuksen sisäpuolelta.

Paikallatulostuksesta voi olla myös muita variaatioita ja keinoja, kuten IAAC:n pienet tulostusrobotit.

Sisäpuolelta tulostaessa tulostimen on hyvä olla helposti nostettavissa tai siirrettävissä. Pienestä koosta on hyötyä kuljetuksessa. Pyörivän akselin ja kauaksi ulottuvan tulostuspään avulla tulostusalue voi olla riittävän iso, ettei tulostinta tarvitse siirtää. Helpon siirrettävyyden ansiosta tulostinta voi siirtää kerroksesta seuraavaan. Tällaisia tulostimia käyttää esim. Apis Cor ja Construction 3D.

Ulkopuolelta tulostettaessa tulostimen rungon täytyy olla suurempi kuin tulostettava rakennus. Tulostimen rungon asennus ja kokoaminen on iso työvaihe. Runko voi olla asennettu kiskoille, jolloin tulostusalue voi olla, vaikka koko korttelin tai asuinalueen kokoinen. Tulostimen runkoa voidaan myös nostaa samaan tapaan kuin liukuvalua, jolloin tulostamalla voisi tehdä korkeitakin rakennuksia. Rungon asennus vaatii tasaisen tontin ja alueen tasoituksen.



Kuva 14. Contour crafting tulostinkonsepti.



Kuva 15. Apis Cor tulostinkonsepti.



Kuva 16. TU/e tulostin.

3.2 Betoni

Perinteinen betoni

Betonin valmistus tunnettiin jo Rooman aikoihin. Roomalaiset valmisivat betonin sidosaineen kalkista ja runsaasti piitä sisältävästä tulivuorituhkasta. Tulivuorituhka teki roomalaisesta betonista erittäin

kestävää. Tuhka estää betonia halkeamasta ja siksi osa roomalaisista rakennuksista on kestänyt 2000 vuotta. Roomalaiset käyttivät betonin valmistuksessa mahdollisimman vähän vettä, mikä teki betonista lujaa. Roomalaiset eivät käyttäneet betonissaan raudoituksia vaan rakensivat rakennukset holvikaaritekniikalla. Roomalaiset hyödynsivät holvikaaritekniikalla betonin hyvää puristuslujuutta ja siksi raudoituksia ei tarvittu. [16]

Betonia alettiin käyttää uudestaan vasta 1800-luvulla ja yleisesti 1900-luvun alussa, kun nykyäänkin käytössä oleva Portland-sementti keksittiin. Teräsbetoni kehitettiin 1800-luvun puolivälissä ja siitä kehittyi nykyajan käytetyin rakennusmateriaali. Raudoitusten ansiosta teräsbetonilla on myös hyvä vetolujuus, joka mahdollisti pitempien jänneväliden käytön. [18]

Betoni koostuu nykyään sementistä, vedestä ja kiviaineesta. Sementtinä käytetään yleisimmin Portland-sementtiä. Portland-sementti koostuu Portland-klinkeristä, johon lisätään sitoutumisen säätöä varten kipsiä. Sementtiä on betonissa 8 - 16 paino-%. Vetenä käytetään yleensä tavallista hanavettä. Betonin tilavuudesta noin 65 – 80% on runkoainetta eli kiviainesta. Kiviaines koostuu erikokoisista kivirakeista, joiden raekoko vaihtelee tyypillisesti 0,02 - 0,16 mm välillä. Runkoaineena käytetään yleensä mursketta, luonnonsoraa ja luonnonhiekkaa. Runkoaineena voidaan käyttää myös murskattua betonia. Betonissa käytetyllä kivilajilla, kiviaineksen laadulla ja käytetyllä kiven raekoolla on suuri merkitys betonin ominaisuuksiin. [17]

Betonilla on suuri puristuslujuus, yleensä 30 – 80 MPa. Korkealujuusbetoneilla puristuslujuus voi olla 60 – 100 MPa. Betonin lujuutta säädetään betonin koostumuksella ja vesisementtisuhteella. Vesisementtisuhteella on suuri merkitys lujuuden lisäksi betonin muihin ominaisuuksiin, kuten notkeuteen, työstettävyyteen ja kuivumisaikaan. Materiaaliteknologian myötä betonin puristuslujuutta on saatu parannettua. Betonin heikkous on sen huono vetolujuus. Betonin vetolujuus on vain 1/10 sen puristuslujuudesta. [17]

Betonin ominaisuuksia voidaan säätää myös pienillä määrillä erilaisia lisäaineita. Lisäaineita on erityyppisiä, kuten notkistimet, hidastimet ja huokostimet. Notkistimet parantavat betonin työstettävyyttä ja hidastimet hidastavat betonin sitoutumista. Huokostimet lisäävät betonin huokoisuutta ja parantavat betonin pakkasenkestävyyttä. [19]

Betonin runkoaineen ja sideaineen lisänä voidaan käyttää myös mineraalisia seosaineita. Seosaineita lisätään seokseen määrältään enemmän kuin lisäaineita. Seosaineilla voidaan lisätä betonin lujuutta, kestävyyttä, tiiviyyttä, koossapysyvyyttä ja notkeutta. Betonin seosaineina käytetään esim. lentotuhkaa, masuunikuonajauhetta ja silikaa eli pii-dioksidia. [17]

Tulostettavat betoniseokset

Betonin tulostukseen käytetyt betoniseokset vaihtelevat yrityksiensä välillä. Tässä osassa keskitytään erityisesti betonin pursotuksessa käytettyihin betoniseoksiin. Yritysten käyttämät betoniseokset ovat usein yritysten pitkän ajan testausten tulosta, kokeilun ja erehdyksen kautta. Betoniseosten tarkkoja tietoja halutaan salata, siksi niistä on vaikea löytää tarkkaa tietoa, mutta tulostettavista betoniseoksista on kuitenkin tehty joitakin tutkimuksia.

Contour crafting

Contour crafting on käyttänyt seoksessaan notkistavia lisäaineita. Notkistavilla lisäaineilla saadaan vähennettyä veden määrää ilman että työstettävyys huononee [20]. Samalla betonin lujuus parantuu, kun saadaan pienennettyä vesi/sementti suhdetta. Vesi/sementti-suhteeksi on saatu lähes 0,5 ja puristuslujuudeksi Contour crafting on mitannut 18,9 N/mm². Notkistavilla lisäaineilla voidaan nopeuttaa betonin sitoutumista ja lujuudenkehitystä [20]. Runkoaineena on käytetty hiekkaa, mutta hiekan laadusta ei ole tarkempaa tietoa. Pursotettavassa betonissa suurien raekokojen käyttö on hankalaa, koska suuret kivet voivat tukkia suuttimen suuaukon. Tasakokoinen ja pieni rakeinen runkoaine on hyvä myös pinnanlaadun ja tulostustarkkuuden takia. Contour crafting voi käyttää seoksessaan myös kuituja betonin vahvistuksena, mutta kuitujen tyypistä ja määrästä ei löydy tietoa. [4, s.40]

Portland sementti	37 %
hiekkä	41 %
notkistavat lisäaineet	3 %
vesi	19 %

Taulukon arvot lähteestä (Wolfs R.J.M. 2015)

University of Loughborough

Loughborough yliopisto on tehnyt materiaalitutkimuksia löytääkseen optimaalisen ja lujan betoniseoksen betonin pursotustekniikkaan. Tutkimuksessa tutkittiin viittä eri seosta (taulukko). Kaikissa seoksissa käytettiin polypropyleenimikrokuituja, joiden pituus oli 12 mm ja halkaisija 0,18 mm. Kuitujen määrä oli kaikissa seoksissa tavarantoimittajan suosittelema $1,2\text{kg/m}^3$. Hiekan suurin raekoko oli 2 mm. Seoksissa käytettiin notkistavaa lisäainetta. [4, s.42]

Loughborough yliopiston tutkimat betoniseokset.

materiaali	seoksen osuus (kg/m^3)				
	seos 1	seos 2	seos 3	seos 4	seos 5
hiekkä	1612	1485	1362	1241	1123
sementti	376	446	513	579	643
lentotuhka	107	127	147	165	184
mikrosilika (silica fume/microsilica)	54	64	73	83	92
vesi	150	178	205	232	257

Taulukon arvot lähteestä (Wolfs R.J.M. 2015)

Tulokseksi Loughborough yliopisto sai, että seos 4 on kaikkein optimaalisin tutkituista seoksista. Seoksen hiekka/sidosaine suhde on 3:2. Seoksessa on mikrokuituja $1,2\text{kg/m}^3$. Seoksen sidosaineina on 70 % sementtiä, 20 % lentotuhkaa ja 10 % mikrosilikaa. Seoksen vesi/sidos-aineet suhde on 0,26. Lisäaineina seoksessa ovat supernotkistin ja hidastin, joiden annokset ovat 1 % ja 0,5 % sidosaineiden painosta. [4, s.42]

University of Southern California

Etelä-Kalifornian yliopiston on tehnyt tutkimuksen, jossa on selvitetty eri seosaineiden vaikutusta betonin koostumukseen ja tulostettavuuteen pursotusmenetelmällä. Tutkimuksessa tutkittiin kolmea seosainetta: mikrosilikaa (*silica fume*), muovikuituja ja ”Nano-savea” (*Nano-clay*) eli hienojakoinen puhdistettu savi (*a highly-purified attapulgite clay*), joita verrattiin perinteeseen betoniseokseen. [112]

Tutkimuksen tuloksena todettiin, että mikrosilikan ja ”Nano-saven” lisääminen betoniseokseen vaikuttaa betonimassan muodon pysyvyyteen parantavasti. Myös muovikuidut paransivat hieman betonimassan muodon pysyvyyttä. [112]

Yhteenveto

Tulostettava betonin vesi/sementtisuhteen tulee olla mahdollisimman pieni kuten esimerkkitapauksissa (0,5 ja 0,26). Jotta betonin työstettävyys säilyisi ja vesi/sementtisuhdetta saadaan pienemmäksi, tulee betonin seoksessa käyttää notkistavia lisäaineita. Lisäaineiden avulla voidaan myös säätää betonin sitoutumisnopeutta. Runkoaineena käytetään hienorakeista hiekkaa, jossa suurin raekoko on esimerkiksi 2 mm. Usein tulostettavaan betoniin käytetään myös muovi- tai lasikuituja, joilla saadaan hieman parannettua betonimassan muodon pysyvyyttä. Betonimassan muodon pysyvyyttä voidaan parantaa lisäämällä betoniseokseen muita sidos- ja seosaineita, kuten lentotuhkaa tai mikrosilikaa.

Kuitubetonit

Kuituja lisäämällä voidaan parantaa ja muuttaa betonin ominaisuuksia. Kuidut parantavat betonin vetolujuutta, puristuslujuutta, halkeamien hallintaa, iskunkestävyyttä, kulutuksenkestävyyttä, säilyvyyttä ja palonkestävyyttä (muovikuidut). Kuidut vaikuttavat myös betonimassan muokattavuuteen. Kuidut sitovat betonimassaa ja tekevät siitä sitkeämpää. [21] Betonin pursotuksen kannalta juuri betonimassan sitkeys on oleellista, jotta betonimassa pysyy tulostetussa muodossaan ilman muottia. Tämän takia useat yritykset ovat tutkineet ja hyödyntäneet kuitubetonia betonin tulostuksessa.

Lasikuidut: Lasikuituina käytetään alkalikestävää lasia hyvän kemiallisen kestävyyden takia. Lasikuidut ovat hyvin ohuita ja pituudeltaan noin 12 mm luokkaa. Lasikuitujen määräksi suositellaan noin 0,9 – 1,5 kg/m³. Lasikuidut parantavat betonin mekaanisia ominaisuuksia merkittävästi. Lasikuidut estävät plastista halkeilua ja kurtistumista. Lasikuidut eivät nouse pintaan, kuten kevyemmät mikrokuidut. [23]



Kuva 17. Lasikuituja.

Teräskuidut: Teräskuidut ovat pituudeltaan yleensä 25 – 60 mm ja halkaisijaltaan 0,4 – 1,05 mm. Mitä pidempi kuitu on, sitä parempi se on lujuudeltaan. Hoikemmat teräskuidut taipuvat helposti sekoituksessa. Teräskuidut soveltuvat hyvin erityisesti lattioihin ja niillä voidaan korvata laatan verkkorautoitus. Teräskuitujen määrä lasketaan aina tapauskohtaisesti. [22] [24]



Kuva 18. Teräskuituja.

Muovikuidut: Muovikuidut ovat yleensä polypropyleenikuituja. Muovikuidut jaotellaan mikro- ja makrokuituihin paksuuden mukaan. Pituudeltaan kuidut ovat 10 - 50mm. Muovikuitujen määrä on yleensä 0,9 - 2,0 kg/m³. Muovikuituja käytetään lähinnä betonin plastisten kutistumien ja halkeilujen hallintaa. Muovikuiduilla ei voi korvata rautoituksia. [22] [24]

Mikrokuidut: paksuudeltaan hyvin ohuita, alle 0,3 mm.

Makrokuidut: paksuudeltaan millimetrin luokkaa, yli 0,3 mm.



Kuva 19. Muovisia mikrokuituja.



Kuva 20. Muovisia makrokuituja.

Hiilikuidut: Hiilikuitu on hiilisäikeistä valmistettu kudos. Hiilikuituja voidaan käyttää myös betonissa, vaikka se ei ole toistaiseksi yleistä. Hiilikuidut ovat kevyempiä sekä vetolujuudeltaan vahvempia kuin teräs. Hiilikuidut eivät myöskään ruostu, joten ne voidaan sijoittaa hyvin lähelle betonirakenteen pintaa. Kun suojakerrosta ei tarvitse ottaa huomioon, rakenteet ja seinät voivat olla ohuempia kuin teräsrautoituksia käytettäessä. [113]

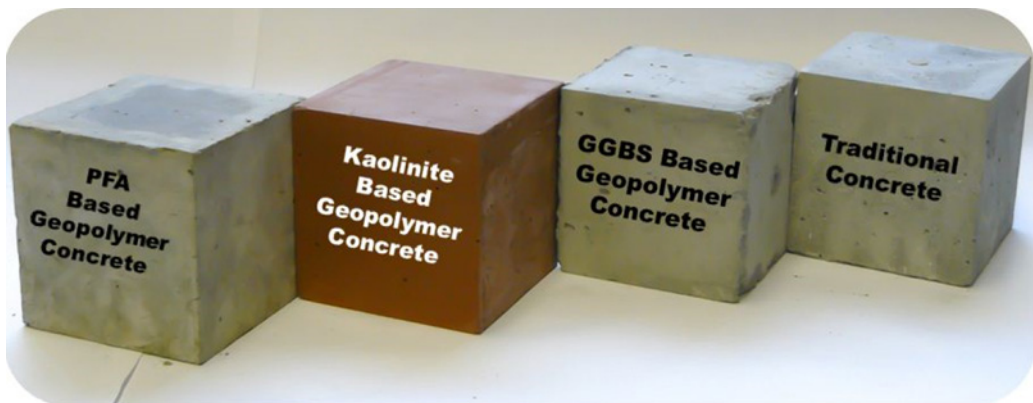


Kuva 21. Hiilikuiduilla lujitettu betoni.

Kuituja käytetään usein betonin tulostuksessa, koska ne parantavat betonimassan ominaisuuksia ja parantavat betonin lujuutta. Muovi- ja lasikuidut ovat yleisimmät käytetyt kuidut betonin tulostuksessa - esimerkiksi Winsun käyttää lasikuiduilla vahvistettua betonia. Teräskuitujen käyttö betonin pursotuksessa on vaikeampaa, koska ne voivat tukkia tulostimen suuttimen tai muita osia. Teräskuiduissa on kuitenkin tulevaisuuden kehitysmahdollisuuksia, koska niillä voitaisiin osittain korvata raudoitusten tarvetta. Tulostimessa voisi olla erillinen pää, joka lisäisi teräskuidut juuri optimaaliseen paikkaan tarvittavien lujuusominaisuuksien perusteella. Hiilikuituja voidaan käyttää myös betonin lujitteina, mutta toistaiseksi hiilikuitujen käyttö betonin lujitteena on harvinaista.

Geopolymeeribetoni

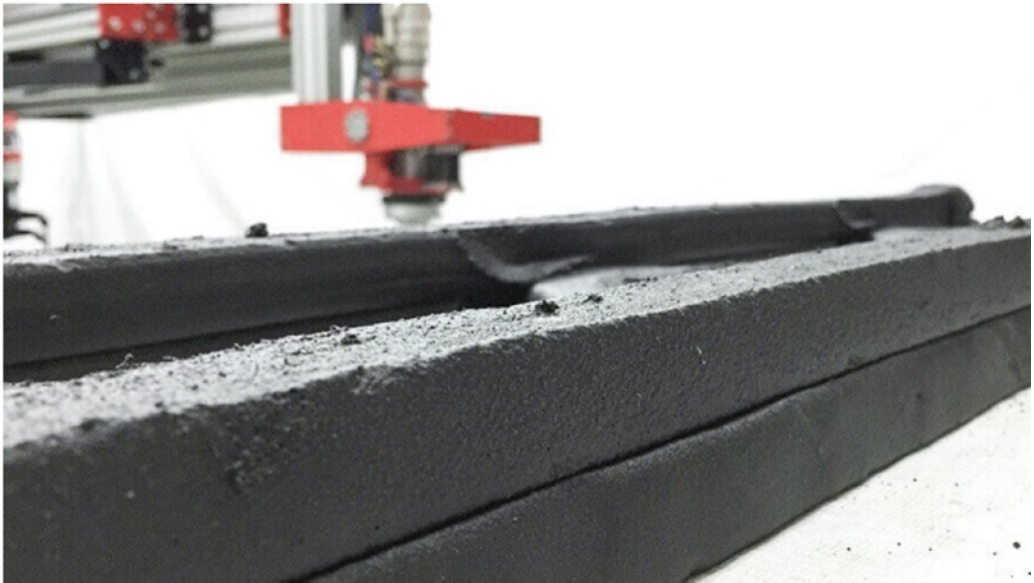
Geopolymeerit ovat epäorgaanisia materiaaleja, joissa on molekyylien polymeerirakenne. Geopolymeerien tuottamiseen käytetyt raaka-aineet ovat pääasiassa maaperästä alkuperäisin olevista mineeraaleista. Geopolymeerisen betonin tekniikka perustuu ajatukseen epäorgaanisten mineraalivalmisteiden käytöstä, joiden tuotanto ei edellytä luonnonvarojen ylimääräistä käyttöä eikä tuota ylimääräisiä hiilidioksidipäästöjä ilmakehään. Geopolymeeribetonin tuotantoon voidaan käyttää teollisuuden sivutuotteita. Geopolymeeribetonin tuotannossa voidaan päästä jopa 90 % pienempiin kasvihuonepäästöihin, kierrättämällä teollisuuden sivutuotteita. [25] [27]



Kuva 22. Kolme erilaista geopolymeeri betonia. Oikeanpuoleisin on perinteistä betonia.

Erinomaisten ominaisuuksien ansiosta geopolymeeribetonia voidaan käyttää laajasti rakentamisessa. Verrattuna perinteiseen portland-betoniin, geopolymeeribetoni on parempi lujuudeltaan, kestävyydeltään, jäätymiskestävyydeltään, palonkestävyydeltään ja lämmöneristyksestään. Se soveltuisi hyvin myös talvibetonointiin. [25] Geopolymeeribetonia käytetään jo mm. Australiassa, Irlannissa ja USA:ssa. Esimerkiksi Australiassa Brisbane lentokentän rakentamiseen käytettiin 70 000 tonnia geopolymeeribetonia [28].

Venäläiset yritykset Apis Cor ja Renca Rus, LLC ovat testanneet geopolymeeribetonin käyttöä 3D-tulostuksessa. Apis Corin mukaan geopolymeeribetonin soveltuu hyvin 3D-tulostukseen sen hyvän koostumuksen ja ominaisuuksien ansiosta: geopolymeeribetonin lepojähmeys, juoksevuus ja säädettävyys sopivat hyvin tulostukseen. Geopolymeeribetonin puristuslujuus on hyvä, jopa 100 MPa. Lisäksi geopolymeeribetoni on kustannustehokas, ekologinen ja sen valmistuksessa voidaan hyödyntää paikallisia raaka-aineita. [25] [26]



Kuva 23. Renca Rus, LLC ja Apis Cor ovat kokeilleet geopolymeeribetonin 3D-tulostusta.

3.3 Käyttökohteet

Käyttökohde	Esimerkkitapaus/yritys	Valmistustavat
Perustukset	Apis Cor	Betonin pursotusta voidaan käyttää perustusten muotteina. (Lisää betonimuoteista kappaleessa 7.2)
Alapohja, välipohja, yläpohja	Winsun: Dubai office	Laattoja voidaan valmistaa kuten seiniä eli pystysuunnassa. Katto, seinät ja lattia voidaan tulostaa yhtenä kappaleena (piirinä) ja kääntää asentaessa oikein päin. (kuva 26 ja 29)
Kantava runko	Winsun, HuaShang Tengda, De Slaapfabriek	Winsun lisää kantaviin tulostettuihin osiin raudoituksia tulostuksen jälkeen ja tekee täyttövaluja. Näin Winsun täyttää Kiinan rakennusmääräykset. Toinen kiinalainen yritys HuaShang Tengda pursottaa betonia valmiiksi asennettujen raudoitusten ympärille. Hotel-yritys De Slaapfabriek tekee Eurooppaan 3D-tulostetun rakennuksen.
Seinäelementit	FIMAtec	Suomalainen yritys FIMAtec tulostaa tehtaalla seinäelementtejä, joissa on tarvittavat raudoitukset ja lämmöneristykset.
Seinät, väliseinät	Useita esimerkkejä	Seinien tulostus pursottamalla on yleisin sovelluskohde. Kaikki seinät voidaan tulostaa kerralla kerros kerrokselta tai sitten voidaan valmistaa yksittäisiä seinäelementtejä.
Pilarit	Total Kustom, IAAC, NCCR, Emerging objects	Pilareita voidaan tehdä pursottamalla kuten seiniä. Myös liukuvalu soveltuu hyvin pilareiden valmistukseen.

Portaat	Betabram	Betabram on kokeillut valmistaa betonia pursottamalla pienet kierreportaat.
Julkisivut	Emerging objects	Betonista voidaan tulostaa julkisivukäyttöön tiiliä, harkkoja, paneeleja ja muita pintaverhoilukappaleita. Sidosaineruiskutusmenetelmä sopii hyvin pienten ja monimuotoisten kappaleiden tulostukseen.
Sillat (kävelysillat)	IAAC, Madrid TU/e, Hollanti	IAAC on 3D-tulostanut betonista kävelysillan Madridiin (kuva 42). TU/e on 3D-tulostanut betonista pursotusmenetelmällä sillan Hollantiin 2017. [116]
Penkit, pöydät	D-shape, Emerging objects	Betonisia puiston penkkejä ym. on tehty pursottamalla sekä sidosaineruiskutusmenetelmällä. (kuva 38)
Paviljongit, ympäristötaide ja puutarhat	Emerging objects, D-shape, Total kustom, XtreeE	Yritykset ovat tehneet erilaisia paviljonkeja ja muita ympäristö- ja kaupunkitaidekappaleita puistoihin ja puutarhoihin. (kuva 36)

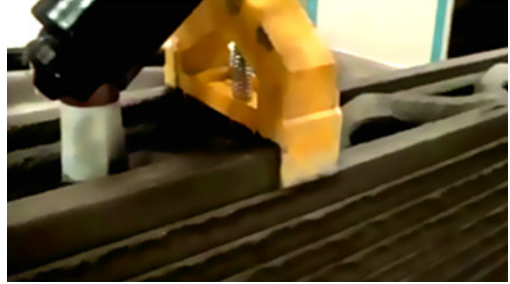
3.4 Lista alalla toimivista yrityksistä

Yritys/ instituutio	Valtio	Vuosiluku	Menetelmä	Tulostukset
Apis Cor	Venäjä, (USA)	2015-	Pursotus, paikallatulos, tulostin talon sisällä	Koetalo, talon seiniä ja perustuksia
BetAbram	Slovenia	2012-	Pursotus, paikallatulos, tulostin talon ulkopuolella	Kehittävät ja tuottavat betonitulostimia yritysten käyttöön.
Contour Crafting corp.	USA, Kalifornia	1998-	Pursotus, paikallatulos, tulostin talon ulkopuolella	Tekniikan ja konseptin kehitystä, tutkimuksia, tulostettuja koeseiniä, tulostimen kehitystä.
Constructions 3D	Ranska	2016-	Pursotus, paikallatulos, tulostin talon sisällä	Konsepti, ensimmäiset tulostukset vuoden 2017 aikana
CyBe	Hollanti	2013-	Pursotus, tehdas- ja	Puiston penkki, pingis-

			paikallatulos, robottikäsivarsi	pöytä, R&Drone Laboratory Dubai
Danish Technological Institute	Tanska	2016-	Pursotus, tehdastulos, robottikäsivarsi	Workshop, tutkimus ja koetulos
D-Shape	Britannia, (Italia)	2006-	Sidosaineruiskutusmenetelmä, hiekka	Testirakennelmia, "veistoksia", koralleja (vedenalaisia rakennelmia)
Emerging objects	USA, Kalifornia	2011-	Sidosaineruiskutusmenetelmä, hiekka, sementti	Paviljonki, penkki, maanjäristystä kestävä pylväs, erimuotoisia kappaleita, harkkoja, tiiliä, ym.
FIMAtec	Suomi	2015-	Pursotus, robotiikka, tehdasvalmistus	Betonisandwich-elementtejä, tulostimen kehitys
HuaShang Tengda	Kiina	2016-	Pursotus, paikallatulos, tulostin talon ulkopuolella	Kaksikerroksinen ja 400 m ² kartano
IAAC (The Institute for Advanced Architecture of Catalonia)	Espanja	2002-	Pursotus, tehdas- ja paikallatulos, robottikäsivarsi sekä minirobotit	Tutkimuksia, koetuloksia, Ensimmäinen 3D-tulostettu silta
Loughborough University, Forster & partners, Skanska	Britannia	2007-	Pursotus, tehdastulos	Tutkimuksia, koetuloksia
Lund University	Ruotsi	2015-	Pursotus	Betonitulostimen kehitysprojekti
NCCR (The National Centre of Competence in Research)	Sveitsi	2016-	Liukuvalu SDC (Smart dynamic casting)	Monimuotoisten pilarien liukuvaluja
Spetsavia	Venäjä	2015-	Pursotus, tehdastulos ja paikallatulos, tulostin talon ulkopuolella	Koetalon seiniä, puiston penkki
Total Kustom	USA	2014-	Pursotus, paikallatulos, tulostin talon ulkopuolella	"Leikkilinna", Hotellin sviitti Filippiineillä
TU/e (Eindhoven University of Technology)	Hollanti	2015-	Pursotus, tehdastulos	Tutkimuksia, koetuloksia, pyöräilytila 2017
Voxeljet	Saksa	1999-	Sidosaineruiskutusmenetelmä	Valmistaa ja kehittää 3D-tulostuslaitteita
Win sun (Ying chuang)	Kiina	2004-	Pursotus, tehdastulos	10 omakotitaloa, APEC villa, 1100 m ² kartano, 5-kerroksinen kerrostalo, Dubai toimistorakennus
XtreeE	Ranska	2015-	Pursotus	Prototyyppinä, 3D-paviljonki, aaltoileva seinä, pylväikkö

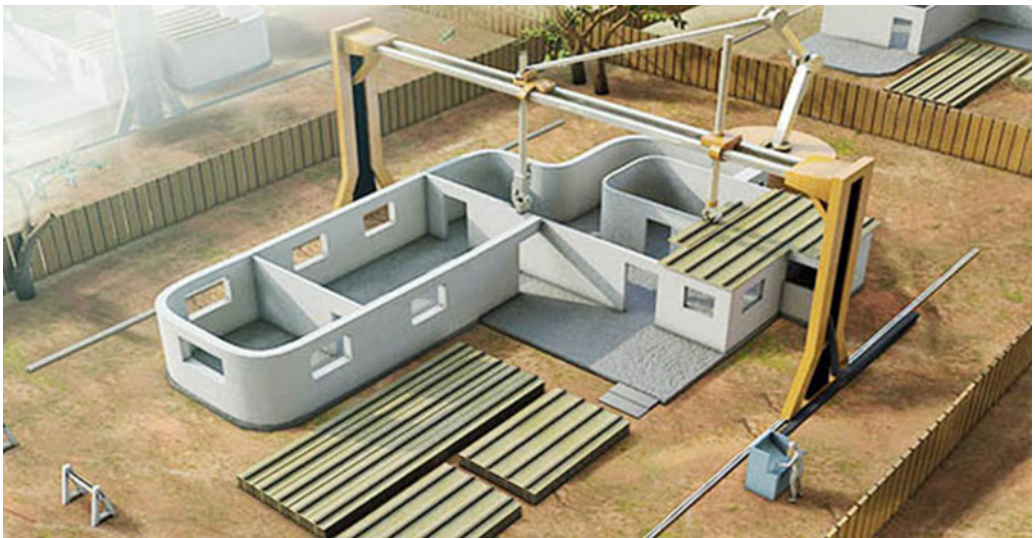
Contour crafting

Contour crafting on ensimmäisiä betonin pursotustekniikoita. Ensimmäiset julkaisut on tehnyt Behrokh Khoshnevis (Etelä-Kalifornian yliopisto) vuonna 1998 [4, s.39]. Contour crafting tulostaa kerros kerrokselta betonista tai keraamista (savesta) suuria kappaleita, kuten seiniä. Tulostimen päässä on sivutasoittimet, jotka säätyvät tasoittamaan myös vinoja pintoja. Contour crafting on kehittänyt seinän tulostukseen monisuutinpään, joka tulostaa seinän ulko- ja sisäpinnan sekä siksak-kuvioisen keskikrakenteen.



Kuva 24. Contour crafting tulostuspää.

Contour crafting on toistaiseksi tulostanut tehdasympäristössä koeseiniä, erimuotisia koekappaleita ja kuuaseman konseptimallin. Yrityksen tavoitteena ja konseptina on kuitenkin tulostaa rakennuksia rakennuspaikalla. Contour crafting on kehittänyt paikallatulostukseen tarkoitettua tulostinta ja on aloittanut vuoden 2017 aikana tulostimen sarjatuotannon. Ensimmäiset tulostimet julkaistaan alkuvuodesta 2018. Yritys on hakenut rahoitusta myös ensimmäisen koetalon tulostukseen. [30]



Kuva 25. Contour crafting 3D-tulostimen konsepti periaate.

Tulostin asennetaan tasaiselle rakennuspaikalle kiskojen päälle, joilla se liikkuu pituussuunnassa. Tulostuspää liikkuu rungossa leveys- ja korkeussuunnassa. Tulostettava rakennus jää tulostimen sisäpuolelle, joten tulostimen rungon on oltava suurempi kuin tulostettava rakennus.

Ensimmäisen vaiheen tulostimet ovat tarkoitettu omakotitalojen tulostukseen. Tulostamisessa on tulostuspään lisäksi nostovarsi, jolla asennetaan aukonylityspalkkeja, katto- ja välipohjaelementtejä. [29]

Contour crafting on myös tutkinut ja kehittänyt automaattista raudoitusta. Tulevaisuudessa tekniikkaan lisätään automaattinen järjestelmä viemärien ja sähköjen asennukseen. Jatkossa yrityksellä on tarkoituksena laajentaa tulostusta myös suurempiin rakennuksiin, kuten kouluhin, sairaaloihin, kerrostaloihin sekä asuinalueisiin. [29]

Winsun / Ying chuang

(Yingchuang Building Technique (Shanghai) Co. Ltd.) tunnetaan länsimaissa nimellä Winsun. Winsun on vuonna 2002 perustettu yritys, joka tutkii ja kehittää uusia materiaaleja ja tekniikoita rakennuslalle. Yrityksellä on noin 200 työntekijää ja 98 kansallista patenttia. Yritys aloitti kehitystyön 3D-tulostuksen parissa vuonna 2004. [5] Winsun -yrityksen betonin 3D-tulostus perustuu samanlaiseen pursotusmenetelmään kuin Contour crafting -yrityksellä. Tulostus tapahtuu kuitenkin tehtaan sisään rakennetulla suurella tulostimella ja kappaleet toimitetaan paikan päälle osina. Winsun-yrityksen tulostin on yksi maailman suurimpia: 10 m leveä, 150 m pitkä ja 6,6 m korkea [31]. Suuri tulostusalue mahdollistaa useiden kappaleiden valmistuksen samalla tulostuskerralla.

Tulostuspää poikkeaa Contour crafting -yrityksen käyttämästä tulostuspäästä, sillä siinä ei ole sivutasoittimia ja vain yksi tulostuspää. Winsun tekee samanlaista ”siksak” -kuvioista seinärakennetta kuin Contour crafting. Ontto seinärakenne mahdollistaa raudoitusten, putkien ym. asennuksen seinän sisään. Materiaalina Winsun käyttää lasikuiduilla vahvistettua betonia. Winsun käyttää betonin raaka-aineena kierrätettyä rakennusjätettä (hiekkaa ja betonia). [5]

Winsun käyttää betonitulostuksen lisäksi rakennuksissa perinteisiä palkkeja, pilareita, raudoituksia ja rakenteellisia täyttöjä, jotta raken-

teet täyttävät Kiinan rakennusmääräykset. Winsun työskentelee läheisesti Kiinan viranomaisten kanssa kehittääkseen rakennussäädöksiä ja määräyksiä myönteisempään suuntaan. [31]

Winsun maine on viime vuosina menettänyt uskottavuutta ja yrityksen julkaiseman tiedon luotettavuudesta on herännyt epäilyjä. Contour crafting -menetelmän kehittänyt professori Behrokh Khoshnevis on syyttänyt yritystä valheellisista väitteistä ja erityisesti tulostusten nopeuksia (10 taloa päivässä) on spekuloitu vääriksi. Yrityksestä löytyy hyvin vähän virallista tietoa eikä yritys ole antanut tarkempaa tietoa siitä, kuinka rakennukset on tulostettu ja rakennettu. [32]



Kuva 26. Vuonna 2013 Winsun tulosti 10 pientä ja yksinkertaista omakotitaloa.



Kuvat 27 ja 28. Vuonna 2014 Winsun tulosti 5 kerroksisen kerrostalon sekä 1100m² kartanon.



Kuva 29. Vuonna 2016 Winsun tulosti maailman ensimmäisen 3D-tulostetun toimitorakennuksen Dubaihin.

Winsun on tehnyt useita eri prototyyppisiä ja koetaloja osoittaakseen tekniikan toimivuuden. Yritys pyrkii seuraavaksi lisäämään tuotannon volyymia ja tavoittelemaan suurempia markkinoita. Suunnitelmissa on rakentaa 100 uutta franchising tehdasta, jotka 3D-tulostaisivat rakennusosia 5 000 000 rakennusneliölle vuodessa. Ensimmäiset franchising tehtaot tulevat Shanghain alueelle ja ovat jo suunnitteluvaiheessa. Winsun suunnittelee myös työmaalla toimivaa tulostinta, jolla voisi tulostaa korkeita rakennuksia. Osoittaakseen tekniikan ja menetelmän toimivuuden, yritys aikoo ostaa maata Shanghaista ja rakentaa seuraavaksi yli 100 m korkean ja 200 000 m² kokoisen pilvenpiirtäjän. [31]

Kiinan lisäksi Winsun on pyrkinyt myös Lähi-Idän markkinoille. Winsun on tehnyt yhteistyötä Dubaissa ja neuvotellut myös Egyptin ja Saudi-Arabian hallitusten kanssa tulevista rakennusprojekteista. Saudi-Arabiaan on suunnitteilla myös tehdas. Lähi-Idän lisäksi Winsun pyrkii Afrikan markkinoille. [31]

Apis Cor

Apis Cor kehittää rakennusten tulostamiseen tarkoitettua 3D-tulostinta, joka perustuu betonin pursotustekniikkaan. Tulostus tapahtuu rakennuspaikalla. Kuorma-auton lavalla kuljetettava 3D-tulostin on helppo siirtää ja asentamiseen ei mene yrityksen mukaan tuntia pidempään.

Asennus ei tarvitse täysin tasaista alustaa, vaan tulostusalueella voi olla 10 cm korkeuseroja. [35]

Systeemiin kuuluu tulostin, automaattinen betoniseoksen valmistusyksikkö ja betonisiilo betonin kuiva-aineen varastointiin. Tulostimen pituus on 4,5 m, leveys 1,6 m, korkeus 1,5 m ja se painaa noin 2000 kg. Tulostusnopeus on 10 m/min ja tulostus kerros 25 x 25 mm. Tulostin on nostokurjen tapainen ja sillä voi tulostaa 3,3 metrin korkeuteen. Siinä on pyöreä keskirunko, jonka avulla tulostin voi pyöriä 360 astetta. [35] [36]

Tulostin ylettää tulostamaan kerralla 132 m² kokoisen pyöreän alueen. Se asetetaan yleensä rakennuksen sisään, jotta tulostin yltää tulostamaan mahdollisimman suuren alueen. Tulostus voidaan tehdä myös sääsuojan alla, jolloin sää ei vaikuta tulostukseen. Tulostin vaatii kaksi työntekijää operoimaan tulostusta. [36]

Tulostimella voidaan tulostaa betonisia seiniä, seinän osia sekä muotteja perustusten valua varten. Raudoitukset ja aukkojen ylityspalkit tai tuet on asennettava tällä hetkellä vielä käsivoimin. Lämmöneristys lisätään jälkikäteen kerrosten väliin. Eristeenä voi käyttää esim. polyuretaania. Tulostuksen jälkeen seinät voidaan vielä tasoittaa ja pintakäsitellä. Tulostin käyttää erikoisbetoniseosta, jossa on käytetty erikoislisäaineita ja lujittavia aineita [34].



Kuva 30. Apis Cor -yrityksen 3D-tulostin tulostaa koetaloa sääsuojan alla.

Yrityksen tekniikka soveltuu erityisesti pientaloihin, mutta tekniikalla voi tulostaa myös isompia kokonaisuuksia, kun monta tulostinta työskentelee samanaikaisesti tai mikäli tulostus tehdään osissa ja tulostinta siirretään paikasta toiseen. Yritys suosittelee tällä hetkellä korkeintaan kolmekerroksisen rakennuksen tulostusta. Tulevaisuudessa yrityksellä on tavoitteena tulostaa myös lattiaita ja kattoja sekä lisäksi automatisoida seinien ja perustusten raudoitusten asennus. [35]

Koetalo

Joulukuussa 2016 Apis Cor tulosti koetalon käyttämällä tulostusjärjestelmäänsä ja havainnollisti järjestelmän toimintaa käytännön kohteessa. Apis Cor rakensi koetaloa yhteistyössä kuuden muun yrityksen kanssa. Koetalo rakennettiin Apis Cor -yrityksen testilaitoksen alueelle Venäjälle (Stupino, Moskova). Koetalon pinta-ala on 38m². Rakennuksen seinät ja väliseinät tehtiin alle päivässä ja kokonaistulostusaika oli 24 tuntia. [37]

Koetalo suunniteltiin yksikerroksiseksi asuinrakennukseksi, jonka muoto oli hyvin tavallisesta talosta poikkeava. Koetalo on muodoltaan pyöreä ja spiraalimainen. Rakennuksen muodolla oli tarkoitus osoittaa laitteiden joustavuus ja toimivuus erilaisten muotojen rakentamiseen. [37]

Koetalo tulostettiin vuoden kylmimpään aikaan joulukuussa, joten talvi lisäsi projektiin haastetta. Betoniseoksen tulostus on mahdollista vain yli 5 asteen lämpötilassa. Laitteisto kestää kuitenkin jopa -35 asteen lämpötiloja. Tulostus tehtiin lämmitetyn sääsuojan sisällä, jotta lämpötila oli riittävä tulostukseen. Tulevaisuudessa uudet materiaalit, kuten geopolymeeribetoni, voisivat mahdollistaa tulostamisen kaikkina vuoden aikoina. [37]

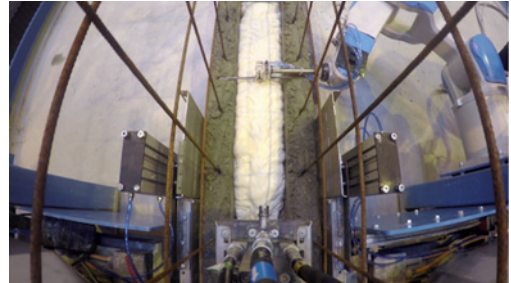


Kuva 31. Apis Cor -yrityksen koetalo valmiina.

Apis Cor lupaa jopa 70 % kustannussäästöjä perinteisiin rakennustapoihin verrattuna. Säästöt syntyvät monesta asiasta: Materiaalin logistiikkaa tarvitaan 3,7 kertaa vähemmän, kuin harkkoseinässä. Materiaalia tarvitaan vähemmän, sillä materiaalihukkaa ei synny. Rakentaminen harkkoseinään verrattuna onnistuu kuusi kertaa nopeampaa ja työntekijöitä tarvitaan vähemmän. Työmaalle ei tarvita perinteisiä työkoneita ja työkaluja. [35]

FIMAtec

Imatralainen yritys FIMAtec on kehittänyt rakennuselementtien tulostukseen tarkoitetun 3D-tulostimen. Tulostimen mitat ovat 8 x 6 x 5,5 metriä ja pituutta voidaan jatkaa jatkojohteilla 16 metriin. FIMAtecin Robocatt-tulostin on valmistettu yhteistyössä Lujabetonin ja teknologiayhtiö ABB:n kanssa. Tulostin on hyvin edistyksellinen ja monipuolisempi kilpailijoihin verrattuna, koska tulostimella voi valmistaa betoni-sandwichelementtejä kaikkineen osineen. Tulostin tulostaa samanaikaisesti betonisia ulkokuoria sekä polyuretaanista sisäeristettä. Tulostimessa on robottivarsia, jotka asentavat myös raudoitukset ja jopa sähkökalusteet automaattisesti prosessin aikana. Tulostin myös tasoittaa pinnan, sekä maalaa tai rappaa pinnan valmiiksi. [40] [41] [42]



Kuva 32. FIMAtecin 2017 julkaisema tulostuslaite pursottaa polyuretaanieristettä ja asentaa raudoituksia.

FIMAtecin tavoitteena on ollut tehdä laite, joka valmistaa Suomen rakennusmääräykset täyttävää seinää kustannustehokkaasti ja, että se on suoraan sovitettavissa elementtitehtaan tuotantojärjestelmään. Laite mahtuu myös merikonttiin ja on siirreltävässä myös rakennuspaikalle. Tulostusta on myös helpotettu ja tehty käyttäjäystävälliseksi. Tulostin voi muuttaa suoraan rakennesuunnittelijan suunnitteleman elementin tiedoston G-koodiksi, jonka pohjalta tulostin osaa valmistaa elementin. [40] [41]

FIMAtecin tekniikalla elementtien valmistus onnistuu aiempaa kustannustehokkaammin, koska valmistukseen ei tarvita erikseen muotien tekoa. Elementit voivat olla myös hyvin erilaisia ilman, että se

lisäisi kustannuksia. Myös kaarevien seinäelementtien valmistus onnistuu ilman suurempia lisäkustannuksia. Tämä voi mahdollistaa uudenlaisen arkkitehtuurin tekemistä elementtirakentamisella. [40] [41]

Teknisiä tietoja:

- Betonin laatu K45-K60
- Tulostusnopeus 40 - 100mm/s (6x3 metrinen elementti valmistuu 40 minuutissa.)

Monolite UK / D-Shape

D-Shape (nykyään Monolite UK) on italialaisen Enrico Dinin perustama yritys. Yritys on kehittänyt suuren sidosaineruiskutusmenetelmän 3D-tulostimen rakennusten tulostamiseen. Dinin visiona oli skaalata olemassa olevaa tekniikkaa rakennusten mittakaavaan. Tulostimen rungon koko on 6x6x6 m ja tulostimessa on 300 ruiskutuspäätä. Tulostuskerroksen paksuus on 5mm ja tulostuksen tarkkuus 1mm. Enrico Dinin alkuperäisenä ajatuksena oli käyttää sementtiä tulostusmateriaalina, mutta koska vesi ei toiminut ruiskutuksessa hyvin, käytetään laitteessa klooripohjaista nestettä ja sidosaineena hiekan ja metallioksidin seosta. Yhdistelmästä syntyy prosessissa keinotekoista hiekkakiveä. [6]

D-Shape teki ensimmäisiä koetulostuksia 2007. ”*Radiolaria*” veistos on yrityksen suurin, tärkein ja kuuluisin tulostus. Veistoksen tavoitteena oli todistaa ja osoittaa tekniikan ja konseptin toimivuus rakennusten mittakaavan tulostuksissa. Täysikokoisen veistoksen tulostus valmistui 2009, mutta se tulostettiin osissa toisin kuin aiempi pienempi versio. [44] Veistos oli tarkoituksena asentaa liikenneympyrään Pontederaan Italiaan, mutta se ei ole vielä saanut rakennuslupaa [6].



Kuva 33. Enrico Dini ja täysikokoinen ”*Radiolaria*” veistos kokoamisvaiheessa.

Toinen kuuluisa toteutus on vedenalaisen ekopuiston rakentaminen Porto Santo Stefanoon, Italiaan. Hankkeessa on kymmenen 3D-tulostettua veistosta, eri taiteilijoiden teoksia, jotka auttavat ja edistävät alueen eläimistön ja kasviston ja kalojen uudelleen istuttamista. Teokset

toimivat koralliriuttoina kalojen suojapaikkana ja kasvuston alustana. Teokset viedään 10 – 15 metrin syvyyteen ja toimivat myös sukelluskohteina. D-shape on tulostanut myös muita kohteita, kuten minitalon, konsepti talon rungon osia, pöydän, tuolin, ym. [45]



Kuva 34. yksi koralliriuttaveistok-sista.



Kuva 35. 3D-tulostettuja konseptitalon rungon osia.

Emerging Objects

Emerging Objects on 3D-tulostukseen erikoistunut yritys, joka 3D-tulostaa arkkitehtuurisia kappaleita, rakennuskomponentteja, sisustusesineitä ja ympäristötaidetta. Yritys valmistaa tuotteita useilla eri lisäävän valmistuksen tekniikoilla, kuten materiaalin pursotus, sidosaineruiskutus, laminointi ja nesteen fotopolymeerisointi. Lisäksi yrityksellä on käytössään suuri valikoima eri tulostusmateriaaleja, kuten akryyliä, sementtiä, keraamia, metallia, nylonia, paperia, muovia, kumia, suolaa, hiekkaa, puuta, ym. [46]

Yritys on valmistanut sidosaineruiskutusmenetelmällä betonia. Betonin tulostukseen on käytetty erityistä sementtikomposiittia, joka koostuu pääasiassa rautaoksidittomasta portland-sementistä. Rautaoksidin poistaminen tekee betonista vaaleampaa ja poistaa betonille ominaisen harmaan värin. [47]

Yritys on valmistanut tekniikalla monimuotoisia komponentteja, joita yhdistämällä voi rakentaa suurempia kokonaisuuksia. Esimerkiksi ”Bloom”-paviljongin valmistukseen on käytetty 840 uniikkia osaa. Osien tulostukseen on käytetty 11 pienempää jauhepeti 3D-tulostinta. Osista kootaan 16 isompaa esivalmistettua paneelia, joista voi koota paviljongin muutamassa tunnissa. [48]



Kuva 36. "Bloom" paviljonki.



Kuva 37. Quake column.

Emerging Objects valmistaa myös useista materiaaleista monimuotoisia julkisivu harkkoja ja tiiliä. Lisäksi yritys on kehittänyt maanjäristystä paremmin kestävässä pylvään nimeltä "*Quake column*", joka on tehty 3D-tulostetuista harkkoista, jotka limittyvät ja lukittautuvat toisiinsa. [46]



Kuva 38. Sementistä tehty penkki.

IAAC

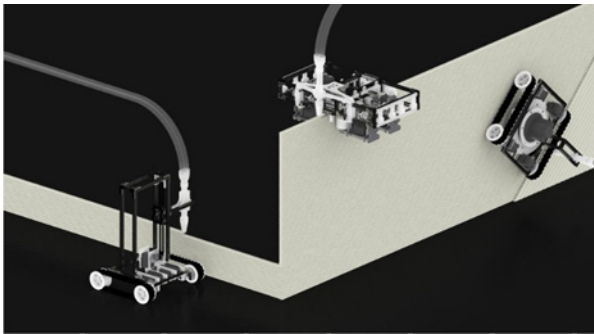
IAAC (*The Institute for Advanced Architecture of Catalonia*) on tutkimus-, koulutus-, tuotanto- ja tiedekeskus Barcelonassa, Espanjassa. IAAC on tutkinut suuren mittakaavan 3D-tulostamista jo 15 vuoden ajan. IAAC on keskittynyt erityisesti tutkimaan robotteja ja 3D-tulostamista rakennustyömaaympäristöön. IAAC on mm. kehittänyt kaapeleiden varassa olevaa betonin ja saven pursotusmenetelmään perustuvaa 3D-tulostinta. Lisäksi IAAC on tulostanut pursottamalla myös savea ja betonia teollisen robottikäsivarteen asennetun tulostus-



Kuva 39. IAAC:n kaapelitulostin.

pään avulla. [49] IAAC on tutkinut ja kehittänyt näiden lisäksi useita muita erilaisia 3D-tulostuslaitteita eri materiaaleille.

IAAC on vuonna 2013 kehittänyt toimintakonseptin, joka muodostuu kolmesta pienestä ”minirobotista”, jotka yhdessä voivat tulostaa suuriakin rakennelmia. Kaikki kolme minirobotia ovat betonia tai savea pursottavia. Kaikilla kolmella robotilla on oma tehtävänsä. Ensimmäinen minirobotti on perustusrobotti, joka tulostaa rakennelman ensimmäiset 15 cm. Perustusrobotti kulkee maata pitkin ja tulostaa viereen kerros kerrokselta seinämää. Toinen minirobotti nostetaan tulostetun seinämän päälle ja se tarttuu seinämään kiinni. ”Tarttuva” minirobotti nousee aina aiemman kerroksen päälle ja tulostaa taakseen uutta kerrosta. ”Tarttuvalla” minirobotilla tulostetaan suurin osa rakennelmasta. Kolmas minirobotti pystyy kiipeämään rakennelman seinämää pitkin. Sillä voidaan tulostaa seinämän pintakerros sekä erilaisia kuviota tai yksityiskohtia pintoihin. Minirobotti pysyy seinämässä kiinni imuvoiman ja tyhjiögeneraattorinsa avulla. ”Tyhjiörobotti” voi liikkua vapaasti tulostetulla seinämällä. [49]



Kuva 40. IAAC:n kolme minirobotia.



Kuva 41. IAAC testaa minirobotia ulkoilmassa.

Vuonna 2017 IAAC on valmistanut yhteistyössä Enrico Dinin (D-Shape) kanssa maailman ensimmäisen 3D-tulostetun sillan. Silta on 12 m pitkä ja 1,75 m leveä kävelysilta ja se on asennettu Madridiin, Espanjaan. Siltaan on käytetty mikrokuiduilla vahvistettua betonia. Sillan tulostusmenetelmästä ei ole tietoa. Sillan vapaa ja optimoitu muoto sekä yhteistyö D-Shape yrityksen kanssa viittaisi sidosaineruiskutusmenetelmään. [50] [51]



Kuva 42. Maailman ensimmäinen 3D-tulostettu kävelysilta.

Construction 3D

Ranskalainen Construction 3D -yritys kehittää 3D-tulostinta jolla voisi sen mukaan tulostaa 75 m² talon betonirakenteet päivässä. Yritys mainostaa valmistuksen olevan useita kertoja halvempaa kuin perinteisillä tavoilla, mutta toisaalta yrityksen tulostuslaite on vasta kehitysvaiheessa. Se pohjautuu hydrauliseen nostimeen, johon on lisätty tulostuspää. Laitteiston etuna on helppo kuljetettavuus, ja sen pieni koko mahdollistaa tulostimen siirtelyn tulostuspaikalla. Pitkä hydraulinen käsivarsi puolestaan mahdollistaa pitkän tulostusalueen. Laite kytketään ulkopuolella sijaitsevaan materiaalisäiliöön, josta betoni pumpataan tulostuspäälle.

Tulostuslaitteen hinta-arvio on kehityksen tässä vaiheessa noin 400.000 €, ja yritys aikoo julkistaa laitteen vuoden 2017 aikana. Ensimmäinen testitalo on suunniteltu valmistuvan vuoden loppuun mennessä. [52]



Kuva 43. Concrete 3D –yrityksen näkemys betonin tulostuslaitteesta.

3.5 Betonin lisäävän valmistuksen kehittymismahdollisuudet

Tekniikoiden kehitys

Tulevaisuudessa pursotustekniikan tulostuspäät ovat edistyneempiä, niillä voidaan tulostaa useita eri materiaaleja kerralla ja niissä voi olla tulostuksen lisäksi muita toiminnallisuuksia. Tulostuspäässä voisi olla esimerkiksi mekanismi, jolla karhennetaan kerrosten välistä pintaa. Karhempi pinta lisää kerrosten välistä pinta-alaa ja parantaa kerrosten välistä lujuutta. Tulostuspäässä voisi olla täryttävä osa, joka myös lujuuttaisi betonia. [53, s.103]

Tulevaisuudessa erityisesti raudoitusten lisääminen betoniin kehittyy. Tulostuspään lisäksi tulostimissa voisi olla raudoitus ”pistooleja” tai robottivarsia, jotka lisäävät raudoituksia tulostuksen aikana. Raudoitusten lisäksi tulostuspäässä voisi olla toiminnallisuus, jonka avulla lisätään kuituja oikean suuntaisesti pursotus kerrosten välille tai kerroksiin. [53, s.111] Raudoitus olisi myös mahdollista toteuttaa ennen tulostusta robotin avulla – tällöin betoni pursotettaisiin tai ruiskutettaisiin raudoitusten ympärille. Raudoitusrobotista on jo nyt esimerkkejä, joista on kerrottu lisää osiossa 4 metallien lisäävä valmistus.

Pursotusmenetelmän lisäksi myös muut betonin lisäävän valmistuksen tekniikat kehittyvät jatkuvasti. Sidosaineruiskutusmenetelmässä

sementin käyttö yleistyne, mutta toistaalta menetelmä soveltuu erityisen hyvin komposiittimateriaalien valmistukseen.

Eri menetelmien yhdistelmät yleistyvät ja saattavat toimia myös osana materiaalia poistavia järjestelmiä mittatarkkuuden varmistamiseksi. Metalliteollisuuden puolella 3D-tulostimiin on viime vuosien aikana alkanut ilmaantua erinäisiä sisäänrakennettuja laadunvalvontajärjestelmiä ja sama on välttämätöntä myös rakennuspuolelle suunnatuissa laitteissa.

3D-skannerien yleistyminen luo mahdollisuuksia adaptiivisten järjestelmien luomiseen – laitteisto voi mitata valmistettua rakennetta ja muuttaa itse materiaalin syöttönopeutta tai laatua parhaan tuloksen saavuttamiseksi.

Liukuvalutekniikassa on myös paljon kehittymismahdollisuuksia, kuten automatisoinnin ja 3D-mallin hyödyntäminen.

Materiaalien kehitys

Tulevaisuudessa uusien materiaalien kehitys ja varsinkin monimateriaalitulostuksen kehitys tuo uusia mahdollisuuksia rakentamiseen. Monimateriaalitulostuspäällä voisi tulostaa monikerroksista seinärakennetta, jossa eri seinän osilla voisi olla erilaisia ominaisuuksia. [53, s.103] Ulkokerroksessa voisi olla betonia, jossa on vettä ja likaa hylkivä pinnoite. Seinän keskiosassa voisi olla lujaa kuitubetonia ja polyuretaani lämmöneristekerros. Seinän sisäkerroksessa voisi olla akustisesti parempia ominaisuuksia tai se voisi olla koristeellisempi esim. värjättyä betonia tai lasimurskepintaista betonia. Materiaali voisi muuttua myös seinän eri osissa esim. osa seinästä olisi tavallista betonia ja osa valoa läpi päästävää betonia.

Uusien betonien kehitys jatkuu edelleen. Tähän mennessä on kehitetty esim. valoa läpi päästävää betonia, geopolymeeribetoneja ja kuitubetoneja. Kierrätysmateriaalien käyttö 3D-tulostuskelpoisen betonin raaka-aineena voisi tehdä rakentamisesta ekologisempaa. Rakennusjätteen määrä voisi pienentyä, kun hukkamateriaalia syntyy vähemmän ja käytettyjä materiaaleja voitaisiin hyödyntää uudelleen.



Kuva 44. Valoa läpi päästävää betonia.

4 Metallien lisäävä valmistus

4.1 Valmistusmenetelmät

Suorakerrostusmenetelmä

Suorakerrostusmenetelmä on lisäävän valmistuksen prosessi, jossa kohdistettua lämpöenergiaa käytetään materiaalien yhdistämiseen, sulattamalla materiaalia samanaikaisesti sijoittamisen kanssa. Lämpöenergia voidaan tuottaa laser- tai elektronisäteellä tai plasmakaarella ja syötettävä materiaali voi olla jauhetta tai lankaa. [1, s.38] Metallilankaa käytettäessä menetelmä on käytännössä hitsausta, esim. MX3D käyttää robottikäsiavarteen yhdistettyä hitsauslaitetta, joka tekee jatkuvaa hitsausta mallinnettua reittiä pitkin. Menetelmällä voi hitsata terästä, ruostumatonta terästä, alumiinia, pronssia ja kuparia. Hitsaus onnistuu vapaasti ilman tukea, vaikka vaakasuorasti ilmaan (kuva 45). [55]



Kuva 45. MX3D:n robotti demonstroi suorakerrostusmenetelmän mahdollisuuksia.

Jauhepetimenetelmä

Jauhepetimenetelmässä jauhepedin alueita liitetään yhteen selektiivisesti lämpöenergialla esim. lasersäteellä. Menetelmissä on eroa lämmöntuonnissa. Menetelmät voivat olla sintraavia tai sulattavia. Tulostus tapahtuu suljetussa kammiossa, koska tulostukseen käytetään suojakaasua. Kammion koko rajoittaa tulostettavien osien kokoa.

Ylimääräinen jauhe voidaan kiertättää. Jauhepetimenetelmät ovat tällä hetkellä yleisimpiä metallin tulostusprosesseja. [1, s.32] Jauhepetimenetelmällä voidaan tehdä monimuotoisia ja tarkkoja tuloksia.



Kuva 46. EOS:n metallin lasersitraustekniikka.

4.2 Käyttökohteet

Käyttökohde	Yritys / esimerkkitapaus	Valmistustavat
Liitoscappaleet	The Nematox system/ lasijulkisivun liitoscappaleet Ikkunan karmin liitososat	Monimuotoisia ja yksilöllisiä liitoscappaleita voidaan valmistaa jauhepetimenetelmällä.
Metallirakenteet	MX3D/metallisilta Amsterdam	Suorakerrostusmenetelmä
Rauditusverkko	NCCR/seinän raudoitus	Robotti valmistaa pistehitsaamalla pienistä harjateräksen pätkistä rauditusverkkoa.
Metalliset rakennustuotteet	American Standard/ vesihana	Jauhepetimenetelmä (lasersintraus)

4.3 Esimerkkiyrittäjiä ja -tapauksia

MX3D

MX3D on hollantilainen yritys, joka on vuodesta 2014 lähtien kehittänyt teolliseen robottikäsitteeseen yhdistettävää kehittyntä hitsauslaitetta ja ohjelmistoa laitteen ohjaukseen. MX3D valmistaa suorakerrostusmenetelmällä terästä, ruostumatonta terästä, alumiinia, pronssia ja kuparia. [54] [55]

MX3D:n yhtenä projektina on ollut valmistaa 3D-tulostettu silta yhden Amsterdamin kanavan yli. Silta tulostuu usean robotin yhteistyöllä. Robotit tulostavat teräksistä rakennetta ja kiskoa, jota pitkin robotit liikkuvat eteenpäin. Lopullinen sillan rakenne muistuttaa seitistä tehtyä verkkomaista rakennetta, joka on hyvin kevyt, mutta kestävä. Projekti on alkanut vuonna 2015 ja pienempiä prototyyppisiä sillasta on jo tulostettu. Varsinaista siltaa ei ole vielä Amsterdamiin tulostettu. [56]



Kuva 47. MX3D -yristyksen visio sillan 3D-tulostuksesta.

Arup

Suunnitteluyritys Arup tutki teräksisten liitososien valmistamista lisäävän valmistuksen keinoin. Suunnitteluhankkeesta valikoidut liitososat olivat monimutkaisia ja kaikki hieman erilaisia. Liitososien tarkoituksena oli yhdistää, katulamppuja kannattavat kaapelit tukirakenteisiin [57]. Liitososat 3D-tulostivat lisäävän valmistuksen yritykset CRDM/3D Systems ja EOS [58].

Tutkimuksen tuloksena todettiin, että uudelleen suunnitellut ja 3D-tulostetut liitososat kestivät samanlaisia kuormia kuin tavalliset osat, vaikka painoivat 75 % vähemmän. [57] [59] Prototyyppikappaleen valmistus on tällä hetkellä kalliimpaa tuottaa lisäävällä valmistuksella kuin perinteisillä valmistusmenetelmillä, mutta tekniikan kehittymisen ja yleistymisen myötä hinta on laskussa. Tulevaisuudessa lisäävällä valmistuksella on mahdollisuuksia vähentää kustannuksia ja materiaalihukkaa erityisesti monimutkaisissa rakenteissa. [58]



Kuva 48. Vasemmalla hitsaamalla valmistettu osa, keskellä ja oikealla 3D-tulostamalla valmistetut osat.

Arkkitehti Adrian Priestman ja rakennuttaja Skanska UK

Lontoon 6 Bevis Marks rakennuksen katoksen rakenneliitoksen koristepäällys on Britannian ensimmäinen rakennusteollisuuden käyttöön hyväksytty 3D-tulostettu osa. Osaa testattiin kovissa tuulija sääolosuhteissa. Koristepäällys on tulostettu metallista lasersint-raamalla useana kappaleena, vaikka näyttääkin yhtenäiseltä. [60]



Kuva 49. 3D-tulostettu liitoksen koristepäällys.

American Standard

Amerikkalainen yritys American standard tuo markkinoille ensimmäiset 3D-tulostetut vesihanat. Vesihanat on 3D-tulostettu metallista lasersintraustekniikalla. Vesihanoja on 3 erilaista mallia.

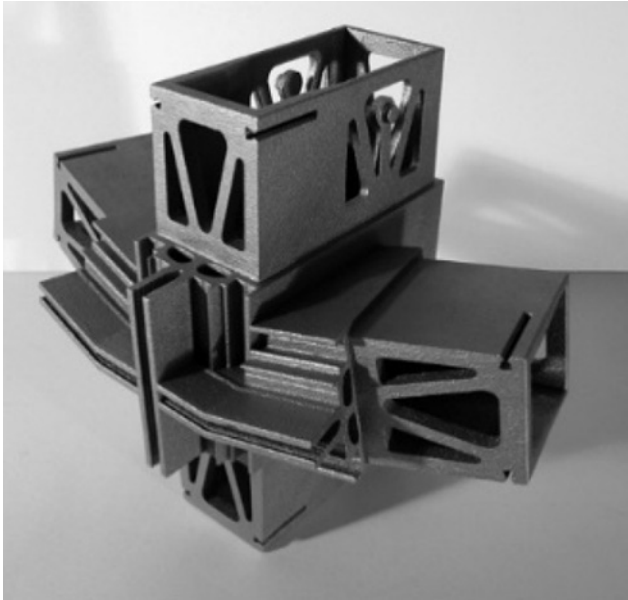
Korkeiden valmistuskustannusten vuoksi vesihanat on suunniteltu ja markkinoitu luksuskoteihin. Vesihanojen hinnat tulevat olemaan arviolta jopa 12 000 – 20 000 dollaria. [61]



Kuva 50. 3D-tulostettu kylpyhuoneen altaan vesihana.

The Nematox system

Nematox-järjestelmä on lasijulkisivujärjestelmä, jossa voidaan tehdä vapaasti erisuuruisia kulmia liitoksiin. Monimutkaiset ja yksilöllisesti räätälöidyt liitoskappaleet voidaan valmistaa 3D-tulostamalla alumiinista jauhepetimenetelmää käyttämällä. Tulostusaika vasemmanpuoleisen kuvan liitoskappaleelle on ollut 76,5 tuntia ja jälkikäsittelyyn aikaa on mennyt 4 tuntia. [62, s.116-119]

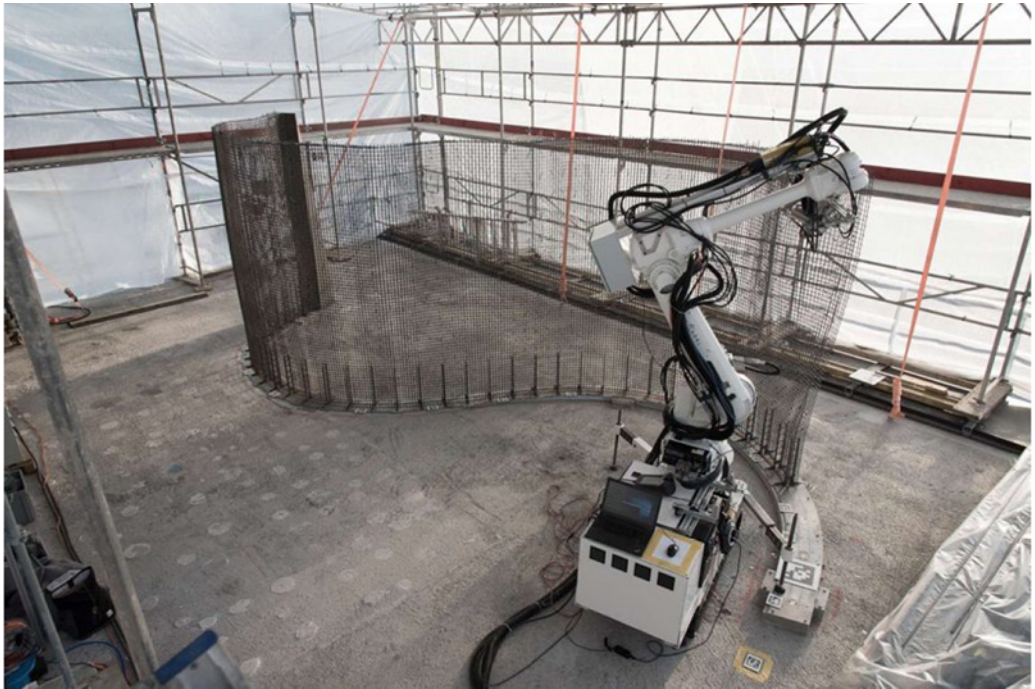


Kuvat 51 ja 52. Nematox-lasijulkisivujärjestelmä.

NCCR (The National Centre of Competence in Research) ETH Zurich

NCCR on kehittänyt Sveitsissä raudoitusrobottia. Robotti valmistaa teräksestä raudoitusverkkoa, pätkimällä terästä ja pistehitsaamalla risteyskohdat yhteen automaattisesti. Kyseessä on vielä kehitysvaiheessa oleva menetelmä, jossa työmiehiä tarvitaan lisäämään pystyteräksiä sekä syöttämään lisää terästä robotille. Robotti voi tehdä monimuotisia seinän raudoituksia ja näin voidaan valmistaa monimuotoisia kantavia seiniä, kuten kuvassa (53).

Tiheä raudoitusverkko toimii myös betonin muottina, kun käytetään erikoisbetoniseosta. Pintaan jäävät raudoitukset voidaan peittää ruis-kubetonilla ja tasoituserroksella. Kuvan (53) kohde sijaitsee Sveitsissä, Dübendorfin kaupungissa. Seinä on tehty rakennuksen kolmannen kerroksen kattohuoneistoon. [63-66]



Kuva 53. NCCR:n robotti valmistaa kaarevan seinän raudoituksia.

5 Muovien ja komposiittien lisäävä valmistus

5.1 Valmistusmenetelmät

Pursotus (Material extrusion)

Muovin pursotus on yleisin, halvin ja yksinkertaisin menetelmä muovin 3D-tulostuksessa. Menetelmässä muovilankaa (filamenttia) sulatetaan ja pursotetaan suuttimesta valikoivasti tulostusalustalle kerros kerrokselta. [1, s.19] Muovin pursotuksessa erityisen tärkeää on oikein valittu tulostuslämpötila ja tulosteen pysyminen kiinni alustassa. Jotkin muovilaadut kutistuvat ja taipuilevat jäähtyessään joka aiheuttaa tulostuksen epäonnistumisen, mikäli kappale ei ole kunnolla kiinni alustassa. Suuttimen lämpötila tulee säätää materiaalin mukaan, koska eri muoveilla on eri sulamislämpötiloja.

Muovin pursotuksen heikkoutena on, että se ei ole geometrisesti täysin vapaata. Tyhjän päälle ei voi pursottaa, vaan muovi tarvitsee alapuolelleen tueksi aiemman kerroksen. Tarvittaessa tukikerros voidaan toteuttaa tukirakenteen tai esimerkiksi vesiliukoisen tukimateriaalin avulla. Nykyään muovin pursotuksesta löytyy myös tekniikoita, joissa muovi jähmettyy ja kovettuu välittömästi pursotuksen jälkeen. Näillä tekniikoilla voidaan tehdä vapaasti erilaisia muotoja ja valmistus ei tarvitse tapahtua kerros kerrokselta. 3D-kynät ovat hyvä esimerkki tällaisesta tekniikasta.

Branch technology käyttää samanlaista tekniikkaa kuin 3D-kynät, mutta suuremmassa mittakaavassa.

Materiaalin ruiskutus (Material jetting)

Menetelmässä ruiskutetaan tulostusmateriaalipisaroita valikoivasti tulostusalueelle kerros kerrokselta. Tulostusmateriaali voi olla UV-kovettuvaa muovia tai vahaa. Menetelmässä voidaan käyttää useita tulostuspäitä ja siten myös monimateriaalitulostus on mahdollista. [1, s.22]

Jauhepetimenetelmä (Powder bed fusion)

Jauhepetimenetelmässä jauhepedin alueita liitetään yhteen selektiivisesti lämpöenergialla esim. lasersäteellä. Jauhepetimenetelmän käyttö muovimateriaalille on vielä toistaiseksi yleisempää kuin metallille. Se soveltuu hyvin teolliseen tuotantoon sillä kappaleita valmistuu koko jauhepedin alueelta samalla kerralla.” (katso osio 4 metallien lisäävä valmistus, jauhepetimenetelmä).

Nesteen fotopolymeerisointi (VAT photopolymerization)

Nesteen fotopolymeerisointimenetelmässä astiassa olevaa nestemäistä fotopolymeeriä kovetetaan valikoivasti UV-valon tai UV-laserin avulla. Menetelmiä on kaksi erilaista. SLA menetelmässä kovetus tapahtuu kerros kerrokselta vaihteittain UV-laserin avulla. Uudenlaisessa CLIP menetelmässä kovetus tapahtuu jatkuvana prosessina UV-valon avulla. [1, s.28]

Nesteen fotopolymeerisointimenetelmällä voidaan vielä toistaiseksi valmistaa vain pieniä kappaleita mutta osa valmistajista kertoo menetelmiensä olevan tulevaisuudessa skaalattavissa myös suurempaan mittakaavaan.

5.2 Käyttökohteet

Käyttökohde	Esimerkkitapaus/yritys	Valmistustavat
Seiniä, väliseiniä sekä alakattoja	Branch technology	Vapaan muodon pursotusmenetelmä, jossa muovi jäähtyy ja kovettuu välittömästi. Branch technology tekee menetelmällä vapaamuotoista muoviristikkoa. Yhdistämällä ristikkoon perinteiset rakennusmateriaalit ja tekniikat, voidaan tehdä monimuotoisia rakennusosia. (Kuva 54)
Paviljonkeja	Stuttgart University, Vulcan paviljonki	Erilaisia paviljonkirakennelmia on tehty pursottavilla 3D-tulostimilla. Paviljongit on tehty tulostamalla pienempiä osia ja kokoamalla osista isompi kokonaisuus.
Kävelysilta	Tongji University, Shanghai	Kiinassa on 3D-tulostettu muovista pursotusmenetelmällä kaksi kävelysiltaa, joista toinen on 11m ja toinen 4m pitkä.
Pienoismallit	katso osio 8.1 pienoismallit	Muovin pursotus, jauhepetimenetelmät, nesteen fotopolymeerisointi

Työkalut ja
sovitteet

Maker3D Oy,
Kommitek Oy

Työkalu valuholvien elementtien asen-
nukseen

Ulkokäyttöön sovel-
tavat huonekalut

Cincinnati Inc

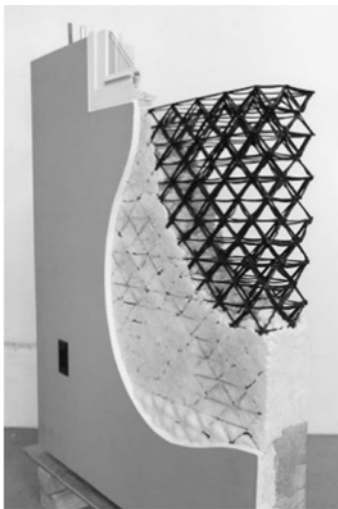
Bambuvahvistetusta, biohajoavasta PLA-
muovista valmistetut huonekalut

5.3 Esimerkkiyrityksiä ja -tapauksia

Branch technology

Amerikkalainen Branch technology on kehittänyt suuren mittakaavan 3D-tulostinta, jolla voi tulostaa vapaata muotoa muovia pursottamalla. Yrityksen 3D-tulostin on kuin suuri 3D-kynä, joka on yhdistetty suureen teolliseen robottikäsivarteen. Robottikäsivarsi on yli 3m korkea ja liikkuu 10m pitkää kiskoa pitkin, joten tulostuksen koko voi olla hyvinkin suuri. 3D-tulostin tulostaa muovin ja hiilikuidun yhdistettä (95 % ABS muovia ja 5 % hiilikuitua). [67] [68]

Menetelmässä 3D-tulostetaan muovista monimuotoista ristikkorakennetta. Ideana on valmistaa muoto 3D-tulostamalla käyttäen mahdollisimman vähän materiaalia jonka jälkeen hyödynnetään perinteisiä rakennusmateriaaleja ja tekniikoita. 3D-tulostus soveltuu hyvin muodon tekemiseen ja perinteisillä rakennusmateriaaleilla rakennusosasta voidaan tehdä luja ja kestävä. [68]



Kuva 54. Branch technology -yrityksen testiseinä.

Kuva 55. 3D-tulostettu paviljonki Miamissa 2016.

Tähän mennessä yritys on 3D-tulostanut kevyitä väliseiniä, vapaa-muotoisia veistoksia ja paviljonkeja. Vuonna 2017 yritys järjesti 3D-tulostetun rakennuksen suunnittelukilpailun. Kilpailun voittajatyö on tarkoitus rakentaa, mutta ennen sitä yritys tekee vielä paljon testauksia täyttääkseen rakennusmääräykset. Branch technology testaa yhdessä MIT:n kanssa 3D-tulostettujen ja betonilla täytettyjen palkkien kestä-vyyttä. [68]

Stuttgart University

Saksassa Stuttgartin yliopiston opiskelijat ovat valmistaneet ro-bottien ja dronen avulla 12 met-riä pitkän paviljongin käyttäen materiaalina lasi- ja hiilikuitua. Valmistusmenetelmässä on haettu inspiraatiota luonnosta. Robotit ja drone kutovat hiilikuitulangasta verkkomaista rakennetta kuin hä-mähäkit. Kaksi robottikäsivartta pujottaa hiilikuitulankaa naulojen ympäri. Drone kuljettaa lankaa pi-temmät matkat. Robotit toimivat yhteistyössä ja kutovat lankaa 3D-mallin mukaisesti. [69]



Kuva 56. Hiilikuidusta kudottu paviljon-ki.

Vulcan paviljonki

Pekingin designviikolla 2015 esi-telttiin maailman suurin 3D-tulos-tettu paviljonki. Se on 3D-tulos-tettu muovista pursottamalla 1086 eri osaa. Rakennelma on 8 metriä leveä ja lähes 3 metriä korkea. Tu-lostamiseen meni 30 päivää ja sii-hen käytettiin 20 suurta 3D-tulos-tinta. Paviljonki on kasattu osista paikanpäällä 12 päivässä. [70]



Kuva 57. Vulcan paviljonki.

”Solar Bytes” paviljonki, USA

Brian Petersin vuonna 2014 suunnittelema ”*Solar bytes*”-paviljonki koostuu 94 uniikista kuusikulmaisesta osasta, jotka on 3D-tulostettu läpikuultavasta muovista pursottamalla. Osissa on keskellä aurinгонvaloa keräävä LED- valo, joka kerää valoa päivän ajan ja valaisee yöllä. [71]



Kuva 58. ”*Solar bytes*”-paviljonki yöllä LED-valot päällä.

DUS Architects

Vuonna 2016 Amsterdamissa on 3D-tulostettu muovista minitalo. Talo on noin 8 m² ja siinä on 3D-tulostamalla valmistetut minikuisti, ulkoraput, sohva/sänky ja miniamme. Seinissä on kokeiltu monimuotoisia julkisivupintoja. Lattia on 3D-tulostettua ristikkkoa, joka on betonilla valamalla täytetty. [72] Minitalo on osa hollantilaisten arkkitehtien projektia, jossa on tarkoituksena rakentaa 3D-tulostettu talo Amsterdamin kanavan varteen [73].



Kuva 59. 3D-tulostettu minitalo Amsterdamin teollisuusalueella.

Cincinnati Inc (BAAM, Big Area Additive Manufacturing)

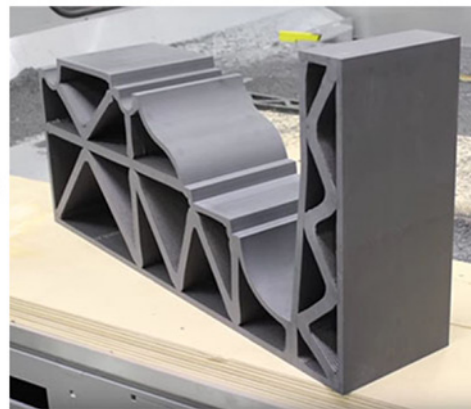
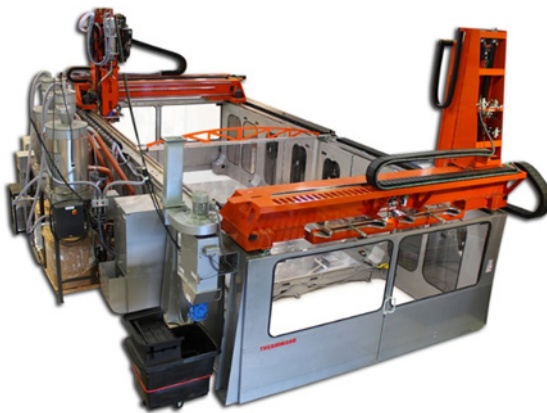
Cincinnati Inc valmistaa tuotenimellä BAAM suuren mittaluokan 3D-tulostinta. Laitteen koko on 10.8 x 3.8 x 4.3 m ja materiaalin syöttönopeus nopeimmillaan 36 kg tunnissa. Yritys on tunnettu mm. ensimmäisestä 3D-tulostetusta Strati-sähköautosta sekä useista muista hiilikuitukomposiitista valmistetuista kappaleista. Cincinnati Inc on myös tehnyt yhteistyötä ORNL (Department of Energy’s Oak Ridge National Laboratory) sekä Branch technologyn kanssa rakennusalan sovelluksissa. Esimerkkinä kuvassa 60 oleva ulkokäyttöön soveltuva myynti/tarjoilupöytä tuoleineen (valmistettiin bambukuiduilla vahvistetusta, biohajoavasta PLA-muovikomposiitista) sekä vapaasti muotoillusta pöydästä. [104, 105]



Kuvat 60 ja 61. Cincinnati Inc:in valmistamia ulkokäyttöön soveltuvia huonekaluja.

Thermwood (LSAM, Large-scale Additive Manufacturing)

Thermwood valmistaa LSAM –nimellä suuren mittakaavan 3D-tulostinta, jossa on yhdistetty 3D-tulostus ja jysintä 3x6 m valmistusalueella. Valmistajan mukaan laitteisto on skaalattavissa aina 30 m pituuteen saakka ja se soveltuu muottien ja työkalujen valmistukseen. Materiaaleina ovat erilaiset muovi-hiilikuitukomposiitit. Valmistajan mukaan laitteistolla pystyy jatkossa valmistamaan autoklaavikäyttöön soveltuvia muotteja ja työkaluja ilman, että valmistettuja kappaleita tarvitsee jälkikäsitellä. [106]



Kuva 62. Thermwoodin LSAM –laite, ja sillä valmistettu esimerkkikappale.

6 Maa-ainesten käyttö lisäävässä valmistuksessa (savi, hiekka, kipsi ym.)

6.1 Valmistusmenetelmät

Pursotus

Savimassaa ja savi-olkiseosta voidaan 3D-tulostaa pursotusmenetelmällä. Saven ja betonin pursotus ei juuri eroa toisistaan ja niitä voidaan tulostaa samanlaisilla 3D-tulostimilla. (katso osio 3 betonin lisäävä valmistus, betonin pursotus).

Sidosaineruiskutus

Sidosaineruiskutusmenetelmällä voidaan 3D-tulostaa kappaleita mm. hiekasta, kipsistä tai keraamisista jauheista. (katso osio 3 betonin lisäävä valmistus, sidosaineruiskutusmenetelmä)

6.2 Käyttökohteet

Valmistusmenetelmä	Esimerkkiyrityksiä	Käyttökohteet
Pursotus	IAAC, WASP	Savimajat, saviseinät, savipylväät, savitiilet
Sidosaineruiskutus	Voxeljet, Emerging Objects	arkkitehtoniset elementit, koriste-esineet, julkisivumateriaalit, tiilet, harkot. Suomalainen Hetitec käyttää Voxeljetin tulostuslaitteita.
Robotit	Construction Robotics, Fastbrick Robotics	julkisivut, tiiliseinät, harkkoseinät

6.3 Esimerkkiyrittäjiä ja -tapauksia

WASP (World's Advanced Saving Project)

WASP on italialainen yritys, joka on kehittänyt vuonna 2015 Bigdelta 3D-tulostimen, jolla voi tulostaa savi- ja savi-olkimassaa sekä betonia. Bigdelta on 12 m korkea, 7 m leveä ja tulostaa pursotusmenetelmällä. [75]

Savi on materiaalina halpaa, ympäristöystävällistä ja sitä on saatavilla ympäri maailman. Savi voidaan ottaa suoraan rakennuspaikalta ja materiaalikustannukset jäävät silloin hyvin vähäisiksi. Bigdelta toimii myös aurinkopaneeleiden virralla, jolloin sitä voidaan käyttää myös paikoissa joissa ei ole sähköä saatavilla. [74]

Tavoitteena yrityksellä on rakentaa savitaloja, joille voisi olla käyttöä ekokylähankkeissa, kehitysmaissa joissa on pulaa halvoista asunnoista sekä hätämajoituksena katastrofitilanteissa. Yritys aloitti vuonna 2016 rakentamaan 3D-tulostettua Shamballa teknologiakylää, joka toimii Italiassa 3D-tulostamisen kehityskeskuksena. [75]



Kuva 63. Bigdelta 3D-tulostin tulostaa EREMO-savimajaa.

IAAC (The Institute for Advanced Architecture of Catalonia)

IAAC on kehittänyt suuren mittakaavan 3D-tulostamista ja tutkinut useaa eri menetelmää ja materiaalia, kuten betonin ja saven 3D-tulostusta pursotusmenetelmällä. AAC:n betonin pursotuksesta ja sovelluksista tarkemmin osiossa 3.4 betonin lisäävä valmistus.

Saven 3D-tulostukseen IAAC on käyttänyt robottikäsivarteen lisättyä tulostuspäätä sekä kaapeleilla

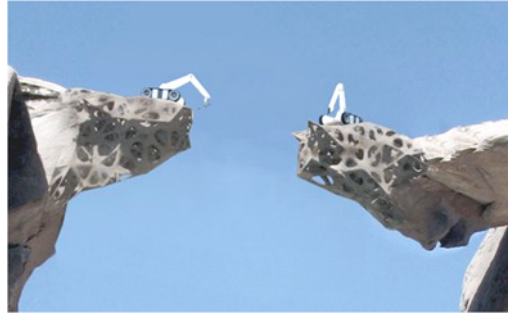


Kuva 64. 3D-tulostetuista saviharkoista pystytetty seinä.

liikkuvaa 3D-tulostinta. Savesta IAAC on tulostanut useita erimuotoisia pylväitä sekä monimuotoisia harkkoja, joista on pystytetty testiseinä (kuva 64). [76] [77]

Savi on materiaalina halpaa ja sitä voi saada suoraan rakennuspaikalta. IAAC käyttää savimassaa, joka kovettuu ilman saven polttamista uunissa 3 kertaa lujemmaksi kuin tavallinen poltetu savi. [76]

IAAC on kehittänyt konseptia 3D-tulostuslaiteesta tai robotista, jolla voidaan tulostaa kiviainesta ruiskutusmenetelmällä. Robotit ovat osa kehityshanketta, jossa kehitetään uusia visioita ja konsepteja 3D-tulostamisesta. Robottia on tähän mennessä testattu tulostamalla pieniä kappaleita, mutta se on vielä kehitysvaiheessa. [114]



Kuva 65. Konseptissa robotit 3D-tulostavat kiviainesta.

Michael Hansmeyer, Benjamin Dillenburger

Michael Hansmeyerin ja Benjamin Dillenburgerin 3D-tulostama arkkitehtuurinen teos muodostuu kahdesta puolikkaasta seinämästä, jotka muodostavat yhdessä luolamaisen tilan. Seinämät on koottu useasta osasta. Tilan seinämät sisältävät valtavan määrän yksityiskohtia ja ornamentteja. Tila muodostuu yli 260 miljoonasta pinnasta (kuva 66). [78] Seinämät on 3D-tulostettu Voxeljetin VX4000 3D-tulostimella, joka tulostaa sidosaineruiskutusmenetelmällä hiekasta hiekkakiveä 0,1mm tarkkuudella. [79]



Kuva 66. Michael Hansmeyerin arkkitehtuurinen seinä.

Seinämien mallintamiseen on kehitetty tietokonepohjainen algoritmi, jonka avulla voidaan luoda hyvinkin monimuotoisia kuvioita ja runsas määrä yksityiskohtia. Michael Hansmeyer on luonut myös muita

samantyyllisiä arkkitehtuurisia teoksia, joissa on runsas määrä erilaisia ornamentteja. Michael Hansmeyer on 3D-tulostanut esim. vuonna 2011 näyttelytilaan 8 pylvästä sekä vuonna 2013 toisen version 3D-tulostetusta seinämästä, jossa on vielä enemmän pintoja ja yksityiskohtia. [78]

3D-tulostetut tiilet ja harkot

Useat yritykset ovat 3D-tulostaneet rakennusmateriaaleja, kuten tiiliä, harkkoja ja paneeleja, joita voidaan käyttää julkisivuissa. 3D-tulostamalla voidaan tehdä hyvin monimuotoisia, mielenkiintoisia ja eläviä julkisivupintoja.

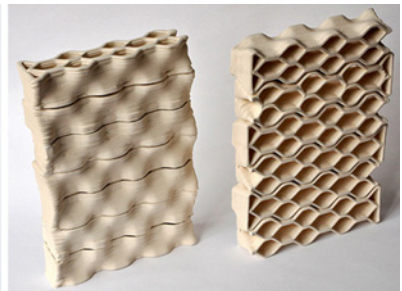
Esimerkiksi Emerging objects on 3D-tulostanut sidosaineruiskutusmenetelmällä hiekasta modulaarisia kappaleita (kuva 67), joita voi käyttää julkisivuissa. Yritys on myös 3D-tulostanut savesta ”cool brick” (kuva 68) savitiiliä, jotka on kehitetty kuumalle ja kuivalle alueelle viilentämään sisäilmaa. [80] Design Lab Workshop on kehittänyt saven pursotusmenetelmällä valmistettavia savitiiliä ja -harkkoja (kuva 69). [81]



Kuva 67. Emerging objects Picoroco block.



Kuva 68. Emerging objects cool brick.



Kuva 69. Design Lab Workshop:n kehittämä hunajakennotiili.

Construction Robotics

Construction Robotics on amerikkalainen yritys, joka kehittää robotteja rakennusalan käyttöön. Yritys on kehittänyt SAM100-puoliauto-maattisen muurausrobotin, joka osaa pursottaa tiileen muurauslaastin ja asettaa tiilen paikalleen. Robotti tarvitsee avuksi kaksi työmiestä, jotka lisäävät liukuhihnalle tiiliä ja putsaavat muurauslaastin. Robotilla voidaan muurata julkisivutiiliä pitkälle suoralle seinälle. Lyhyiden seinien pätkien muuraus robotilla ei ole kannattavaa, koska robo-

tin, lasereiden ja telineiden asentaminen vaatii paljon aikaa. Robotti kuitenkin muuraa huomattavasti ihmistä nopeammin, jopa 3000 tiiltä päivässä, kun keskiverto muurari muuraa noin 500 tiiltä päivässä [84]. SAM100-robottia on jo käytetty Amerikassa muutamilla työmailla. [83] [85]



Kuva 70. SAM100-robotti muuraa julkisivu-
tiiliseinää.



Kuva 71. Construction robotics -yrityksen referenssikohde vuodelta 2015.

Fastbrick Robotics

Australialainen robottiteknologiayritys Fastbrick robotics on kehittänyt robottia Hadrian X, jolla voidaan rakentaa kokoisen talon kaikki seinät harkoista tai tiilistä. Robotti lisää tiiliä kerros kerrokselta juuri oikean kokoisina oikeaan paikkaan 3D-mallin perusteella. Tiilien saumaan robotti ruiskuttaa liimaa tavallisen laastin sijasta. Paikannukseen robotti käyttää lasereita. Rakennustontille asennetaan oikeaan koordinaattiin laserin vastaanotin, josta laser mittaa jatkuvasti etäisyyksiä ja kulmia. [88]



Kuva 72. Rakennusrobotti muuraa talon seiiniä
kerros kerrokselta.



Kuva 73. Hadrian X rakennusrobotti.

Hadrian X on rakennettu rekkaan, jossa on 30-metrinen nosturikaula. Robotti ylettää asentamaan tiiliä isolle alueelle, joten sitä ei tarvitse siirrellä. Tiilet kulkevat oikeassa järjestyksessä nosturikaulassa kulkevalla liukuhihnalla. Tiilet voidaan nostaa lavoittain kurottajalla rekan kyytiin, josta robotti osaa ottaa tiilet automaattisesti. Yritys lupaa robotin nopeudeksi jopa 1000 tiiltä tunnissa ja tarkkuudeksi 1mm toleranssia. Robotin hinnaksi yritys on antanut 2 miljoonaa dollaria. Yritys on tehnyt robottien myymisestä jo alustavia sopimuksia Saudi-Arabian kanssa. Yrityksellä on myös yhteistyösopimus amerikkalaisen Caterpillar yrityksen kanssa. [88]

7 Muottien ja työkalujen valmistus

7.1 Hiekkamuotit

Hiekasta voidaan 3D-tulostaa valumuotteja ja valumalleja sidosaineruiskutusmenetelmällä. Muotteihin voidaan valaa betonia, kipsiä tai muuta vastaavaa materiaalia. Hiekkamuottien hyvinä puolina ovat mm. geometrinen vapaus ja erinomainen tarkkuus, heikkoutena puolestaan korkea hinta verrattuna perinteisiin muottimenetelmiin kun kyseessä ovat yksinkertaiset muodot. Myös vahvistavien rakenteiden sijoittelu 3D-tulostettavassa muotissa voi olla haastavaa. Suomessa hiekkatulosteiden käyttöä rakennusteollisuudessa tutkii ja kehittää hiekan 3D-tulostukseen erikoistunut Hetitec Oy.

Hiekasta voidaan tulostaa kertakäyttöisiä valumuotteja joiden pintakäsittelyksi riittää normaali muottirasva joka estää betonin imeytymisen hiekan sisään. Käytön jälkeen purkaminen onnistuu aukaisemalla tai hajoittamalla.

Hartsikäsittelyn avulla hiekkamuotit lujitetaan kestäväksi lukuisia käyttökertoja. Esimerkkinä kovetetuista hiekkamuoteista ovat tyhjiömuovauksessa käytetyt, epoksilla kovetetut hiekkamuotit, jotka kestävät jatkuvaa käyttöä lähes yhtä hyvin kuin alumiinista valmistetut muotit.

Lisäksi hiekasta voidaan tulostaa valumalli, jonka avulla voidaan valaa sarjatuotantoon soveltuvia silikonimuotteja. Hiekkamuottien etuna on vapaa muotoilu. Varsinkin kertakäyttöisiä muotteja käytettäessä muottiin ei tarvitse suunnitella päästöjä ja kappaleisiin voidaan helposti lisätä esimerkiksi kuvioita, tekstiä tai logoja.

Kertakäyttöiset muotit	Kestomuotit	Hybridimuotit
<ul style="list-style-type: none">- Vastapäästölliset muodot- Muotti tuhoutuu käytön jälkeen	<ul style="list-style-type: none">- Vastapäästöt ei mahdollisia- Voidaan käyttää useita kertoja	<ul style="list-style-type: none">- Yhdistelmä perinteistä ja 3D-tulostettua muottia- Yhdistelmä kertakäyttöistä ja kestopuottia
		

Kuva 74. 3D-tulostuksen käyttö muottien valmistuksessa, lähde Voxeljet [113].

Studio EZCT Pariisissa on käyttänyt Voxeljetin 3D-tulostinta muottien tulostukseen ja testannut korkealujuusbetonien valua hiekkamuotteihin (kuva 76). 3D Creative on valmistanut myös Voxeljetin 3D-tulostimella pienen pesualtaan hiekkamuotin (kuva 75) [90]. Lisäksi Barcelonassa Sagrada Familia kirkon rakentamisessa on kokeiltu hyödyntää 3D-tulostettuja muotteja [91].



Kuva 75. Pesualtaan 3D-tulostettu hiekkamuotti.



Kuva 76. Studio EZCT:n kokeilema hiekkamuotti.



Kuva 77. Valukappale 3D-tulostetun muotin avulla, lähde Voxeljet [113].



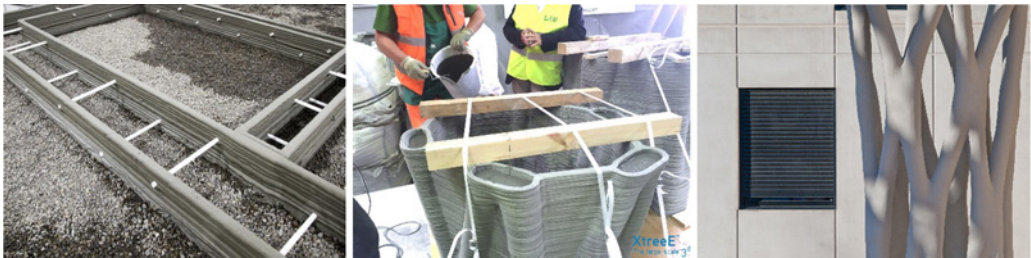
Kuva 78. 3D-tulostettu muotti ja valukappale, lähde Voxeljet [113].



Kuva 79. 3D-tulostettujen muottien käyttö on mahdollista myös suurempien valukappaleiden valmistuksessa, lähde Voxeljet [113].

7.2 Betoniset muotit

Betonin pursotusmenetelmää voidaan hyödyntää myös muottien valmistuksessa. Betonista pursotettu muotti kestää hyvin valua ja se voidaan jättää pintakerrokseksi, tai muotti voidaan raudoittaa ja valaa betonista. Apis Cor on valmistanut pursotusmenetelmällä talon anturiden muotit (kuva 80). Betonin pursotuksen jälkeen muotteihin lisätään raudoitukset ja valetaan muotit täyteen betonilla. [92] XtreeE on valmistanut pursottamalla monimuotoisen pylväikkö (kuva 82). Pintakerros on pursotettu betonista ja sen jälkeen täytetty korkealujuusbetonilla. [93] Betonista 3D-tulostetun muotin etuna on, ettei sitä tarvitse purkaa valun jälkeen.



Kuva 80. Apis Cor on 3D-tulostanut talon anturan muotit.

Kuvat 81 ja 82. XtreeE:n 3D-tulostama pylväikkö.

7.3 Vahamuotit, muovimuotit ja silikonimuotit

Muotteja voidaan 3D-tulostaa myös muilla materiaaleilla, kuten muovista tai vahasta. Lontoon metron laajennushankkeessa vuonna 2016 hyödynnettiin FreeFabin valmistamia 3D-tulostettuja vahamuotteja. Niiden avulla valettiin hankkeen monimuotoisimpia betonielementtejä (kuva 84). [94] [95] Vahamuotit on ensiksi 3D-tulostettu ja sen jäl-

keen pinta on 3D-jyrsitty tarkaksi ja tasaiseksi CNC-jyrsimellä. Vahamuotin etuna on, että se voidaan valun jälkeen sulattaa betonista irti ja käyttää uudelleen seuraavassa muotissa. [96]



Kuva 83. FreeFab vahamuotin valmistusprosessi.



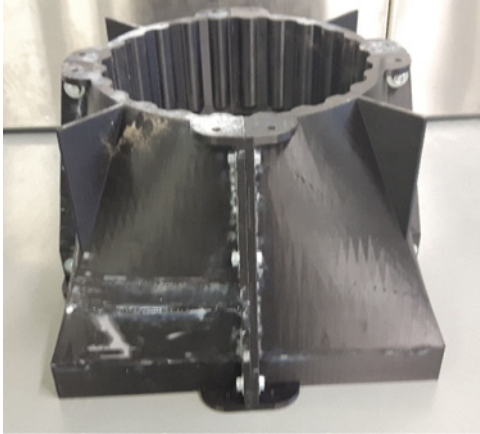
Kuva 84. Lontoon metro-hankkeen vahamuoteilla valetut betonielementit.

Savonia-ammattikorkeakoulun LIVA-hankkeessa on testattu muovista 3D-tulostettujen muottien toimivuutta betonivalussa. Testissä käytettiin German RepRap x1000 3D-tulostinta, jolla voi 3D-tulostaa muovia pursotustekniikalla $1 \times 0,8 \times 0,6\text{m}$ kokoiselle tulostusalueelle. Pursotusmenetelmän etuna on halvempi materiaali kuin esimerkiksi jauhepetimenetelmissä.

Ensimmäisenä koemuottina hankkeessa suunniteltiin ja 3D-tulostettiin antiikin kreikkalaisen pylvään alaosan muotti. Muotti koostuu neljästä osasta, jotka voidaan kiinnittää toisiinsa pulteilla ja muttereilla, sekä valun jälkeen irroittaa ja käyttää uudelleen. Yhden muotin osan tulostusajaksi kertyi noin. 26 tuntia. Yhteensä muotin tulostus kesti noin 105 tuntia, mutta tulostusaikaan vaikuttavat useat tekijät. Muodon optimoinnilla tulostusaika saatiin puolitettua alkuperäisestä suunnitelmasta. Kerrokorkeutena käytettiin 0,4mm, joka vaikutti huomattavasti tulostusaikaan.

Betonivalussa muottiin laitettiin muottiöljyä, joka helpotti muotin irrottamista ja puhdistamista valun jälkeen. Testikappaleen valu onnistui, vaikka betonimuotti ratkesi valun loppuvaiheessa muutamasta tulostuskerroksen välistä. Testistä opittiin, että valupaine ja siitä johtuva valunoste tulee ottaa paremmin huomioon muotin suunnittelussa.

Muotin kiinnitykset tulee olla vahvemmat ja muotin nouseminen tulee estää, jotta muotti ei ratkea tulostuskerrosten välistä, sillä tulostuskerrosten välit ovat kappaleen heikoin kohta.



Kuva 85. Muovista 3D-tulostettu betonimuotti. **Kuva 86.** Betonista valettu pylvään alaosa muotin irroituksen jälkeen.

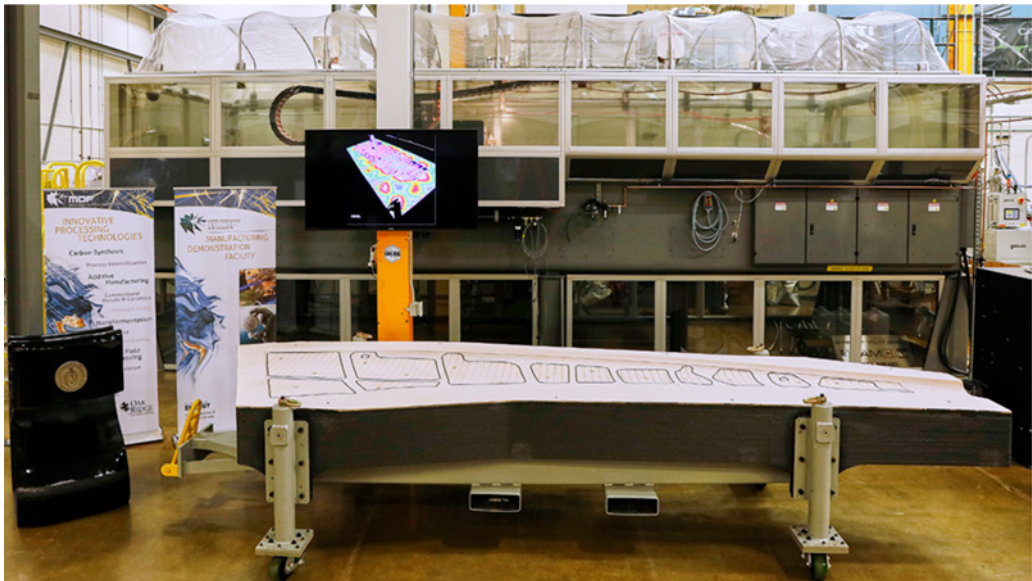
7.4 Työkalut ja apuvälineet

Lisäävän valmistuksen hyödyntämiseen rakennusalan työkalujen ja apuvälineiden valmistukseen pätevät samat säännöt, hyödyt ja rajoitukset kuin muillekin teollisuudenaloille. Auto- ja lentokoneteollisuudessa 3D-tulostamalla valmistetut työkalut ovat yleistymässä, sillä geometrinen vapaus työkalujen suunnittelussa mahdollistaa toiminnallisuuksia, jotka eivät aiemmin ole olleet mahdollisia. Valmistusmenetelmän avulla voidaan valmistaa nopeasti ja kustannustehokkaasti tiettyä tarkoitusta varten räätälöityjä työkaluja pienissä sarjoissa.

Suomalaisena esimerkkinä Kommitek Oy on suunnitellut työkalun turvalliseen elementtiasennukseen paikalla-valuholveissa, joissa on sähkö- tai vesikiertoinen lattialämmitys. Työkalu mahdollistaa sen, että uudisrakennuskohteissa betonirakenteet kuivuvat tehokkaammin rakennusvaiheessa. Maker3D on 3D-tulostanut sarjaa pilottihankkeeseen, joka on mahdollistanut useiden iteraativaiheiden toteuttamisen ennen varsinaisen tuotannon aloittamista.

Lisäävän valmistuksen kehityksessä on viime vuosina havaittu selvää siirtymää entistä suurempien tulostuslaitteiden käyttöön, joka

mahdollistaa varsinkin rakennusallalla uusia sovelluskohteita. Yhtenä esimerkkinä suurikokoisesta työkalusta on alla esitetty 3D-tulostettu leikkaustyökalu, jota Boeing käyttää 777X –lentokonemallinsa valmistuksessa. Työkalun materiaali on hiilikuitu-ABS komposiittia, mitat 5,3 x 1,6 x 0,4 metriä ja painoa sillä on 748 kg. Huomattava etu työkalun valmistuksessa oli valmistusaika: perinteisesti metallista valmistetun, vastaavan työkalun valmistaminen kestää kolme kuukautta, kun 3D-tulostetulla työkalulla tulostusaika oli 30 tuntia. [115]



Kuva 87. Boeingin 3D-tulostettu leikkaustyökalu.

8 Rakennussuunnittelu ja arkkitehtuuri

8.1 Pienoismallit

Prototyyppien ja pienoismallien valmistus on ollut 3D-tulostuksen yleisin käytötapa valmistusmenetelmän kehityksestä asti. Maailmalla arkkitehdit ovat käyttäneet 3D-tulostusta hyödyksi jo varhaisessa vaiheessa esim. Sagrada Familian suunnittelussa jo vuodesta 2001. Kirkon monimuotoisten prototyyppien ja pienoismallien valmistus on nopeutunut huomattavasti 3D-tulostuksen ja 3D-skannauksen ansiosta. Sagrada Familian pienoismallien valmistukseen käytetään jauhepetimenetelmällä toimivaa 3D-tulostinta. [97]

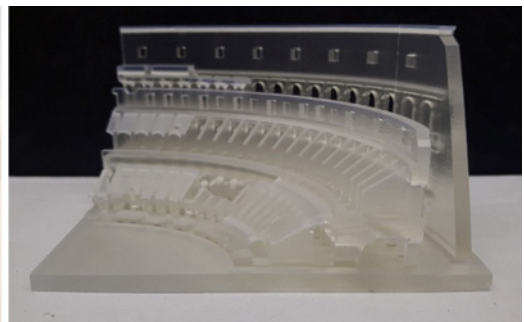
Pienoismalleja voidaan tehdä usealla eri lisäävän valmistuksen menetelmällä. Muovia pursottavilla 3D-tulostimilla voidaan tehdä yksinkertaisia pienoismalleja, mutta menetelmä on usein liian rajoittava arkkitehtuuristen pienoismallien tekemiseen. Jauhepetimenetelmällä voidaan tehdä geometrialtaan vapaita ja tarkkoja pienoismalleja. Resoluutioltaan paras 3D-tulostusmenetelmä pienoismallikäyttöön on tällä hetkellä nesteen fotopolymerisointi. 3D-tulostus mahdollistaa mm. läpinäkyvien materiaalien käytön, josta voi olla hyötyä kohteen havainnollistamisessa.



Kuva 88. Sagrada Familian pienoismalli.



Kuva 89. Muovista pursottamalla 3D-tulostettu pienoismalli.



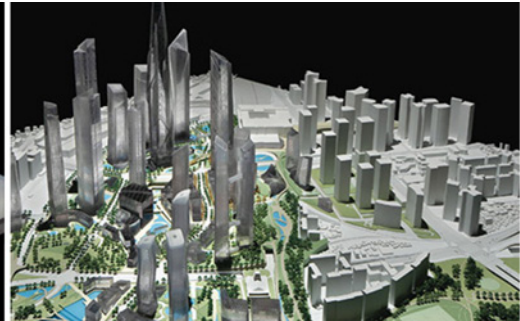
Kuva 90. Nesteen fotopolymerisointi menetelmällä 3D-tulostettu pienoismalli.

3D-mallinnuksen kehitys ja yleistyminen rakennusalalla on edistänyt 3D-tulostuksen hyödyntämistä. Pienoismallit voidaan 3D-tulostaa hyödyntämällä arkkitehdin 3D-mallia. Rakennusalalla käytettyjen mallinnusohjelmien yhteensopivuudessa 3D-tulostukseen on kuitenkin vielä kehitettävää. 3D-tulostetun pienoismallin etuna on hyvä mittasuhteiden tarkkuus, koska se pohjautuu tarkkaan 3D-malliin.

Pienoismalleja voidaan tehdä lopullisesta mallista suunnitelmien esittelyn visualisointiin ja havainnointiin asiakkaalle tai työmaalle. Pienoismalleja voidaan valmistaa myös jo välivaiheen mallista, jolloin voidaan helpommin havaita puutteita ja ongelmia. Niitä käytetäänkin maailmalla yleisesti rakennussuunnittelun ja kaupunkisuunnittelun apuna [98] [99].



Kuva 91. 3D-tulostettu rakennuksen pienoismalli.



Kuva 92. Kaupungin 3D-tulostettu pienoismalli.

3D-tulostettuja pienoismalleja on käytetty hyödyksi myös arkeologisissa kohteissa. Turkissa muinaisen Sagalassos-kaupungin raunioita on tutkittu vuodesta 1990. Projektin lopuksi vuonna 2012 vanhasta kaupungista luotiin rekonstruoitu malli. Materialise valmisti 3D-tulostamalla koko kaupungin pienoismallin käyttäen nesteen fotopolymeerisointimenetelmää. Pienoismalli on leveydeltään noin 1m ja pituudeltaan noin 2m. [109]



Kuva 93. Sagalassos kaupungin raunioiden 3D-tulostettu pienoismalli.

8.2 3D-kynät

3D-kynä perustuu muovin pursotustekniikkaan ja sillä voidaan piirtää kolmiulotteisesti osittain jopa ilmaan. 3Doodler toi ensimmäisenä yrityksenä 3D-kynät markkinoille vuonna 2013. Viime vuosina markkinoille on tullut useita kilpailijoita ja 3D-kynät ovat alkaneet yleistyä ja kehittyä. Halvimpia 3D-kyniä saa jo muutamalla kymmenellä eurolla, mutta paremmat mallit maksavat yli sata euroa. 3D-kynä voisi toimia arkkitehtien uutena luonnosteluvälineenä. Sillä voi tehdä nopeasti luonnosmaisia pienoismalleja rakennuksista. 3D-kynällä voi myös taitojen karttuessa tehdä hyvinkin tarkkoja ja hienoja pienoismalleja. 3D-kynien käyttämät filamentit ovat usein samoja kuin pursotukseen pohjautuvissa 3D-tulostimissa, joten niitä löytyy useita eri värejä ja materiaaleja. Lisäksi osalla 3D-kynistä voidaan käyttää metalli-, nylon-, ja puukuitufilamentteja.



Kuva 94. 3D-kynällä luonnosmaisesti tehty pilvenpiirtäjä.



Kuva 95. Eiffelin torni ja 3D-kynä.

8.3 Arkkitehtuuri

3D-tulostamisen hyödyntäminen tuo aivan uudenlaisia mahdollisuuksia arkkitehtuuriin. 3D-tulostaminen voi mahdollistaa vapaan muotoilun ilman, että se vaikuttaisi merkittävästi kustannuksiin. 3D-tulostaminen voi muuttaa arkkitehtonista muodonantoa vain perusmuotoihin perustuvasta muotoilusta kohti monipuolisempaa ja mielikuvituksellisempaa muotoilua. On mahdollista, että 3D-tulostamisen yleistyminen luo uudenlaisia arkkitehtuurin ilmenemismuotoja.

Digitalisaatio ja 3D-tulostaminen mahdollistaa uuden ”digitaalisen arkkitehtuurin”, jossa pinta voi koostua rajattomasta määrästä erilaisia yksityiskohtia. Esimerkiksi Michael Hansmeyerin 3D-tulostettu huone muodostuu 260 miljoonasta pinnan muodosta (kuva 96). [78]



Kuva 96. Michael Hansmeyerin 3D-tulostettu huone.

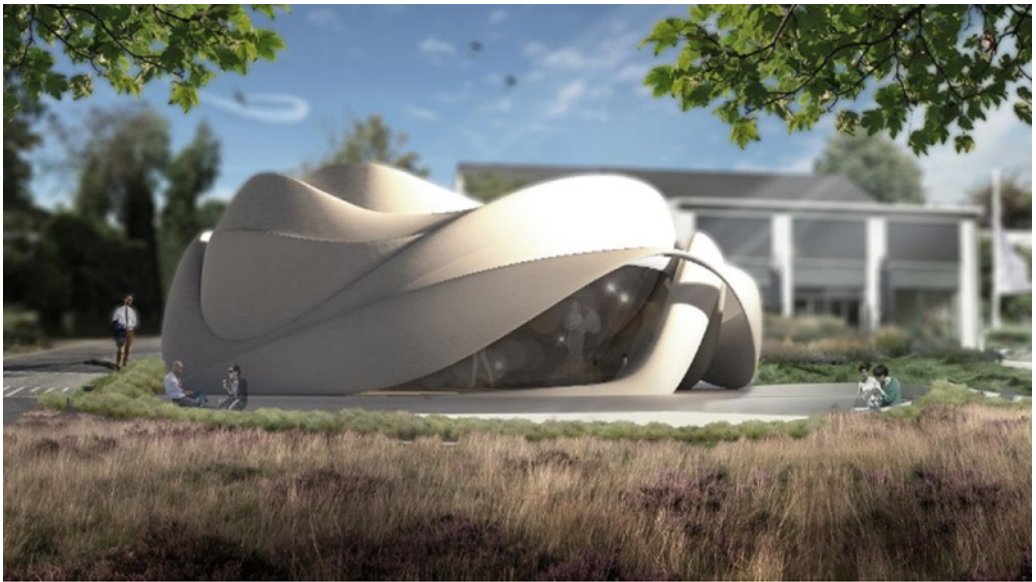
”*Arts and Craft*” oli 1800- ja 1900-luvun vaihteen taidesuuntaus, joka suosi käsityöläisyyttä ja vastusti koneellista valmistusta. Digitaalinen arkkitehtuuri voisi olla uuden ajan suuntaus, joka suosisi uniikkia muotoilua ja uuden ajan käsityöläisyyttä eli 3D-mallinnusta sekä vastustaisi massatuotantoa ja yksinkertaista muotoilua. 3D-tulostus olisi digitaalisen arkkitehtuurin työkalu, jolla suunnitelmat voitaisiin valmistaa.

Toinen uusi arkkitehtuurin ilmenemismuoto voisi olla ”luonnon arkkitehtuuri”, jossa haetaan inspiraatiota luonnosta löytyvistä muodoista. Muotoja voitaisiin jäljitellä esimerkiksi 3D-skannaamalla kallion seinämiä ja 3D-tulostamalla seiniä, jotka ovat muodoltaan kuin kallion seinämät. 3D-tulostukseen voitaisiin käyttää jauhepetimenetelmää ja materiaalina hiekkaa, josta syntyy prosessissa keinotekoista hiekkakiveä.



Maailmalla arkkitehdit ovat tehneet ”futuristisia” konseptisuunnitelmia, joissa on parametrien avulla suunniteltuja kaarevia ja vapaita muotoja. Esimerkiksi osa Zaha Hadidin suunnittelemista rakennuksista ovat muodoltaan tällaisia. Usein suunnitelmat ovat kuitenkin jääneet vain konsepteiksi, koska niiden valmistus olisi ollut liian kallista tai vaikeaa perinteisillä rakennusmenetelmillä. Parametrinen ja ”futuristinen” arkkitehtuurin ilmenemismuoto voi olla kuitenkin mahdollista valmistaa lisäävän valmistuksen keinoin.

Kuva 97. XtreeE –yrityksen 3D-tulostama koeseinä.



Kuva 98. Konsepti Euroopan ensimmäisestä 3D-tulostetusta rakennuksesta.

Hollantilainen De Slaapfabriek -hotelli aikoo rakennuttaa Euroopan ensimmäisen 3D-tulostetun rakennuksen. Rakennus toimisi kokous- ja konferenssitilana. Rakentaminen voi alkaa jo joulukuussa 2017, jos hanke saa rakennusluvan. Hankkeessa on mukana useita toimijoita lisäävän valmistuksen ja rakentamisen aloilta. [108]

Rakennuksen muotoilun idea on saatu lentokoneen aiheuttamista pyörteistä. Rakennus on muotoilultaan ainutlaatuinen, eikä sen rakentaminen perinteisillä rakennusmenetelmillä olisi juuri mahdollista. Rakennus aiotaankin 3D-tulostaa betonista. [108]

9 Yhteenveto

9.1 Nykyinen tilanne

Lisäävän valmistuksen käyttö rakennusosalalla on vielä alkuvaiheessa. Tekniikoita ja 3D-tulostimia vasta kehitetään ja testaillaan valmistamalla erilaisia prototyyppisiä ja koetaloja. Kehityksen taso vaihtelee kun verrataan pienen ja suuren kokoluokan 3D-tulostuksia. Pienen kokoluokan 3D-tulostukset ovat jo tekniikoiltaan ja kustannuksiltaan tätä päivää ja niitä käytetään teollisuudessa jopa sarjatuotantoon. Suuren kokoluokan 3D-tulostukset ovat kehittyneet kovasti 2010-luvun aikana, mutta ovat vielä useissa tapauksissa prototyyppivaiheessa. Tällä hetkellä vaikuttaisi, että lisäävän valmistuksen käyttö yhdessä perinteisten menetelmien kanssa antaa kustannustehokkaimman tuloksen.

Pienoismallit ovat kokonsa takia edelleen helpoin ja selvin käyttökohde lisäävälle valmistukselle rakennusosalalla. Pienoismalleja voidaan 3D-tulostaa usealla eri tekniikalla ja materiaalilla. 3D-mallintamisen yleistyminen rakennusten suunnittelussa edesauttaa 3D-tulostuksen hyödyntämistä pienoismalleissa. Ohjelmien yhteensopivuudessa on vielä kehitettävää, jotta 3D-tulostuksesta voitaisiin tehdä vielä helpompaa. 3D-tulostuspalveluiden yleistyessä ja prosessien helpottuessa, myös pienoismallien 3D-tulostus yleistyy.

Muottien 3D-tulostus betonivaluihin sekä metallivaluihin on jo nykyään hyödynnettävissä oleva käyttökohde 3D-tulostukselle. Muottien valmistus 3D-tulostamisella on järkevää, jos muotit ovat geometrialtaan vaikeita valmistaa. Muotteja voidaan valmistaa hiekasta, kipsistä, muovista, vahasta, ym. Hiekkamuotit voivat olla suuriakin jopa 4x2x1 metriä. Muottien 3D-tulostukselle on kuitenkin myös kilpailevia valmistusmenetelmiä, kuten 3D-jyrsintä CNC-jyrsimellä. Kilpailevilla menetelmillä ei kuitenkaan päästä geometrisesti niin vapaisiin muotoihin kuin 3D-tulostamalla. Erityisesti kaksoiskaarevat pinnat tai muuten haasteelliset geometriset muodot voidaan valmistaa 3D-tulostetuilla muoteilla. 3D-tulostettuja muottien osia voidaan myös yhdistää perinteisiin muotteihin.

Betonin lisäävä valmistus on vielä kehitysvaiheessa, vaikka kokonaisia taloja on jo 3D-tulostettu Kiinassa ja Lähi-idässä. Suurimpana haasteena on suurien rakennusosien lujuusominaisuuksien varmistaminen

ja rakennusmääräysten täyttäminen, jotta 3D-tulostettuja rakennusosia voitaisiin käyttää rakennuksissa. Merkittäviä edistysaskeleita on jo otettu – Suomessakin FIMAtec Oy on kehittänyt betonielementtien 3D-tulostimen, joka tekee seinäelementteihin lämmöneristyksen ja lisää raudoitukset betoniin.

Julkisivumateriaaleja, jotka ovat muotoilultaan hyvin uudenlaisia, voidaan valmistaa 3D-tulostamalla. Savesta, hiekasta, muovista, komposiiteista tai sementistä on mahdollista valmistaa monimuotoisia ja täysin kohteeseen räätälöityjä tiiliä, harkkoja tai paneeleja. Lisäksi viime vuosina on kehitetty rakennusrobotteja, jotka osaavat latioja ja muurata standardimuotoisia tiiliä tai harkkoja.

Pieniä metallikappaleita voidaan 3D-tulostaa metallista hyvällä tarkkuudella ja laadulla. Metallikappaleiden 3D-tulostus voi olla kannattavaa monimuotoisille kappaleille tai jos kappaleen tulee olla mahdollisimman kevyt ja luja. Rakenteellinen optimointi on yksi 3D-tulostuksen etuja ja käyttökohteita. Suurten metallikappaleiden 3D-tulostus on vielä kehitys- ja testivaiheessa, koska niiden kustannustaso ei ole vielä kilpailukykyinen useimpiin käyttötarkoituksiin. Viime vuosina on kehitetty raudoitusrobotteja sekä hitsausrobotteja, joilla voisi rakentaa suuriakin metallirakenteita. Robottien kehitys on kuitenkin vielä alkuvaiheessa, jotta niitä voitaisiin hyödyntää rakentamisessa.

9.2 Lähitulevaisuus (seuraavat 5 - 10 vuotta)

Lisäävä valmistus on yleisesti ottaen erittäin nopeasti kasvava ja kehittyvä ala ja sama pitää paikkansa myös sen soveltamiseen rakennusalan käyttökohteisiin. Lähitulevaisuudessa rakentamisen lisäävä valmistus kehittyy konsepteista ja prototyypeistä kohti käytännön kohteita. Kehitys tulee olemaan erilaista eripuolella maapalloa, koska rakennusmääräykset, rakennusolosuhteet ja rakennustavat eroavat alueittain.

Lähi-idässä on kova usko 3D-tulostuksen tulevaisuuteen rakennusallalla. Lähi-idässä on rikkaita valtioita, jotka haluavat olla 3D-tulostuksen kehityksessä edelläkävijöitä. Dubai on asettanut tavoitteeksi, että vuoteen 2030 mennessä 25 % kaikista uusista rakennuksista Dubaissa rakennetaan hyödyntäen 3D-tulostustekniikkaa [100]. Saudi-Arabiassa on tavoitteena rakentaa 1,5 miljoonaa asuinrakennusta seuraavan 5 vuoden aikana hyödyntäen 3D-tulostustekniikkaa [101].

Kiinassa on tavoitteena kasvattaa 3D-tulostettujen rakennusten tuotantoa vastaamaan paremmin Kiinan valtavaan kysyntää uusista rakennuksista. Winsun yrityksen tavoitteena on rakentaa 100 uutta franchising tehdasta, jotka 3D-tulostaisivat rakennusosia 5 000 000 rakennusneliölle vuodessa. Lisäksi yrityksellä tavoitteena on rakentaa 3D-tulostustekniikkaa hyödyntäen yli 100 m korkea pilvenpiirtäjän Shanghai alueelle. [31]

Eurooppa on ottamassa muun maailman kehityksen etumatkaa kiinni, sillä tähän mennessä suurin osa rakennusalan suuremmista 3D-tulostusprojekteista on tehty Euroopan ulkopuolella. Tähän on ollut syynä heikommat tai vapaammat rakennusmääräykset muissa maissa, joissa projekteja on jo tehty enemmän. Eurooppalaiset tekniikat ja konseptit ovat kuitenkin huomattavasti kehittyneempiä kuin esim. kiinalaiset konseptit, ja niillä on suurempi potentiaali karsia materiaali- ja työ-kustannuksia. [102]

Tanskassa vuonna 2017 pidetyssä rakennusalan 3D-tulostus konferenssissa pohdittiin rakentamisen 3D-tulostuksen tulevaisuutta Euroopassa. Konferenssiin osallistui 160 rakennusalan ammattilaista rakentamisen eri osa-alueilta. Konferenssin asiantuntijoiden mukaan 3D-tulostaminen tulee rakennusosalalle myös Euroopassa seuraavan viiden vuoden aikana. Euroopassa 3D-tulostamista tullaan käyttämään hyödyksi aluksi yksittäisten rakennusosien valmistamisessa, mutta pitimmällä aika välillä myös kokonaisten rakennusten valmistuksessa. Asiantuntijoiden mukaan on havaittavissa että jopa 60 % lähiaikojen rakennusalan 3D-tulostushankkeista tehdään Euroopassa. [102]

Ensimmäisen Euroopassa 3D-tulostetun rakennuksen valmistus saat-
taa alkaa jo joulukuussa 2017. Kokous- ja konferenssitilan suunnitte-
lussa ja rakentamisessa on mukana useita eurooppalaisia lisäävän val-
mistuksen ja rakentamisen yrityksiä. [108]

Pohjois-Amerikassa on useita suuria lisäävän valmistuksen yrityksiä ja laitevalmistajia esim. Cincinnati Inc (Baam), Stratasys ja 3D systems, joilta voidaan odottaa lähitulevaisuudessa sovelluksia myös rakennus-
alalle. Alalle tulee lisää uusia yrityksiä kuten kalifornialainen start-up
Cazza Construction technologies, joka on kehittänyt oman konseptin
rakennusten 3D-tulostamiseen.

Amerikkalainen Contour crafting tuo Pohjois-Amerikan, Euroopan ja Lähi-Idän markkinoille 3D-tulostimen rakennusten tulostukseen. Ensimmäinen erä tulee saataville alkuvuodesta 2018. [30] Contour crafting ja Branch Technology aikovat molemmat tehdä lähitulevaisuudessa koetalot Yhdysvaltoihin. [30] [68]

9.3 Tulevaisuus (seuraavat +10 vuotta)

Tulevaisuudessa uusien materiaalien kehitys tuo lisää mahdollisuuksia rakentamiseen ja lisäävän valmistuksen hyödyntämiseen. Tulevaisuuden materiaalit ovat rakenteellisesti kehittyneempiä, esimerkkeinä kuitubetonit ja hiilikuiturakenteet. Rakennusmateriaaleilla voi olla myös uusia ominaisuuksia, betoni voi olla esimerkiksi valoa läpi päästävä tai akustisilta ominaisuuksiltaan parempaa.

Monimateriaalien 3D-tulostus kehittyy tulevaisuudessa ja mahdollistaa useasta materiaalista koostuvat rakenteet. Materiaalia voidaan myös muuttaa rakenteen eri osissa ja rakenteiden ominaisuuksia voidaan optimoida aivan uudella tavalla.

Tulevaisuudessa materiaalit voivat muuttaa muotoaan olosuhteiden mukaan. Muuttuvien materiaalien lisäävästä valmistuksesta puhutaankin nimellä 4D-tulostus. 4D-tulostetut kappaleet voivat muuttaa muotoaan esimerkiksi lämmöstä, auringon valosta tai vedestä. Muuttuville materiaaleille voisi olla sovelluksia rakentamisessa esimerkiksi rakennuksen varjostuksessa, kun aurinkosuojat voisivat laajentua keskipäivän auringossa ja supistua illan hämärtyessä.

Bioteknologia on kehittyvä ala ja tulevaisuudessa biomateriaaleista voi olla sovelluksia myös rakentamiseen. Biomateriaalien lisäävä valmistus voi olla tulevaisuudessa uusi osa-alue. Bioteknologiayritys BioMason on jo kehittänyt menetelmää, jolla voi kasvattaa bakteereista tiiliä. [103]

Lisäävän valmistuksen kehitys jatkuu kiivaana ja markkinoilla toimivien laitetoimittajien määrä kasvaa vuosi vuodelta. Tulevaisuudessa tekniikat ovat selvästi nykyistä nopeampia ja kehittyneempiä – oikeastaan ainoa asiantuntijoiden mielipiteitä jakava tekijä on nopeus, kehitys tapahtuu.

Uudet tekniikat ja menetelmät kehittyvät myös suuren mittakaavan tulostuksiin sopiviksi. Esimerkiksi nesteen fotopolymerisointi on vielä pienten kappaleiden 3D-tulostukseen, mutta tulevaisuudessa menetelmä voi kehittyä myös suurille kappaleille. Tulevaisuudessa robotiikka ja automatisointi lisääntyvät rakentamisessa ja lisäävän valmistuksen menetelmissä.

Arkkitehtuurinen muodon anto voi muuttua tulevaisuudessa lisäävän valmistuksen seurauksena. Se mahdollistaa uudenlaisen geometrisen vapauden rakennusten muotoiluun ja voi lisätä uudenlaisia arkkitehtuurin ilmenemismuotoja.

10 Lähteet

- [1] Alonen Antti, Alonen Lauri & Hietikko Esa (2016) Lisäävän valmistuksen perusteet. Savonia-ammattikorkeakoulu
- [2] Kontturi Hannu (2016) 3D-mallinnuksen ja tietomallinnuksen hyödyntäminen rakennusallalla, opinnäytetyö, SeAMK Tekniikka
- [3] bygging-uddemann.se <http://www.bygging-uddemann.se/slipforming/> Viitattu 17.9.2017
- [4] Wolfs R.J.M (2015) 3D printing of concrete structures, graduation thesis, TU/e Eindhoven University of Technology
- [5] Winsun <http://www.yhbm.com/index.php?m=content&c=index&a=lists&catid=77> Viitattu 1.8.2017
- [6] Enrico Dini IAAC luento (2013) <https://www.youtube.com/watch?v=TTY3hGuVLM8> Viitattu 1.8.2017
- [7] Elstudio 2015 <http://www.elstudio.nl/?p=1904> Viitattu 1.8.2017.
- [8] Ratu-kortisto, Ratu-rakennustyön materiaalisat ja – hukat 1191-S (2000)
- [9] Andrey Rudenko (Total Kustom) 2015 Youtube video, betonin 3D-tulostus <https://www.youtube.com/watch?v=DQ5Elbvvr1M> Viitattu 17.9.2017
- [10] Emerging Objects: <http://www.emergingobjects.com/2013/09/27/concrete/> Viitattu 1.8.2017
- [11] DShape3DPrinting 2012 Youtube video <https://www.youtube.com/watch?v=RYaRUVTwIVc> Viitattu 17.9.2017
- [12] archdaily.com <http://www.archdaily.com/780778/bartlett-students-develop-new-method-for-3d-printing-concrete> Viitattu 1.8.2017
- [13] arch20.com <http://www.arch20.com/new-3d-printing-method-amalgam/> Viitattu 1.8.2017
- [14] Smart dynamic casting youtube video (2014) <https://www.youtube.com/watch?v=BI2LOj4oxcw> Viitattu 1.8.2017
- [15] dfab.ch/smart-dynamic-casting <http://www.dfab.ch/portfolio/smart-dynamic-casting-sdc/> Viitattu 1.8.2017

- [16] romanconcrete.com <http://www.romanconcrete.com/docs/spillway/spillway.htm> Viitattu 1.8.2017
- [17] betoni.com <http://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/> Viitattu 1.8.2017
- [18] betoni.com <http://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/betonin-historia/> Viitattu 1.8.2017
- [19] betoni.com <http://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/betonirakennusmateriaalina/lisaaaineet/> Viitattu 1.8.2017
- [20] finnsementti.fi <http://www.finnsementti.fi/tuotteet/parmix-lisaaaineet/notkistimet> Viitattu 1.8.2017
- [21] rakentaja.fi https://www.rakentaja.fi/artikkelit/9060/kuitubetonilla_lisaa_lujuutta.htm Viitattu 1.8.2017
- [22] betonivuori.fi <http://www.betonivuori.fi/fi/betonit/kuitubetoni> Viitattu 1.8.2017
- [23] semtu.fi <https://www.semtu.fi/fi/tuotteet/kuidut/> Viitattu 1.8.2017
- [24] rudus.fi <http://www.rudus.fi/tuotteet/betoni/kuitubetonit> Viitattu 1.8.2017
- [25] Apis Cor <http://apis-cor.com/en/about/news/geopolymer-concrete> Viitattu 1.8.2017
- [26] all3dp.com <https://all3dp.com/renca-geoconcrete/> Viitattu 1.8.2017
- [27] Geopolymer Research at Queen's University Belfast <https://blogs.qub.ac.uk/geopolymer/geopolymer-background/> Viitattu 1.8.2017
- [28] geopolymer.org <https://www.geopolymer.org/news/70000-tonnes-geopolymer-concrete-airport/> Viitattu 1.8.2017
- [29] contourcrafting.com <http://contourcrafting.com/building-construction/> Viitattu 1.8.2017
- [30] 3ders.org <http://www.3ders.org/articles/20170616-contour-crafting-begins-series-production-of-deployable-construction-3d-printers.html> Viitattu 1.8.2017

[31] Boston Consulting Group (2016) Winsun - Demonstrating the Viability of 3D Printing at Construction Scale, World Economic Forum, ladattavissa osoitteesta: <https://futureofconstruction.org/case/winsun/> Viitattu 1.8.2017

[32] 3dprint.com <https://3dprint.com/57764/winsun-3d-print-fake/> Viitattu 1.8.2017

[33] Apis Cor <http://apis-cor.com/en/> Viitattu 1.8.2017

[34] Apis Cor <http://apis-cor.com/en/faq/stroitelnaya-smes-i-komplektuyushhie/> Viitattu 1.8.2017

[35] ApisCor- Company presentation.pdf, ladattavissa osoitteesta: <http://apis-cor.com/en/documentation/technical-documentation> Viitattu 1.8.2017

[36] ApisCor- Technology description.pdf, ladattavissa osoitteesta: <http://apis-cor.com/en/documentation/technical-documentation> Viitattu 1.8.2017

[37] Apis Cor <http://apis-cor.com/en/about/news/first-house> Viitattu 1.8.2017

[38] Apis Cor youtube kanava <https://www.youtube.com/channel/UCtjcSO-Yk2QXngTzbB5P1p8A> Viitattu 1.8.2017

[39] k2.fi/FIMAtec Oy <http://www.k2.fi/fi/media/ajankohtaista/?news=view&newsID=71> Viitattu 1.8.2017

[40] FIMAtec Oy Lehdistötiedote 23.6.2017 <http://fimatec.fi/lehdistotiedote-23-6-2015-rakentamisen-3d-tulostimet-tulevat/> Viitattu 1.8.2017

[41] FIMAtec Oy Lehdistötiedote 5.5.2017 <http://fimatec.fi/wp-content/uploads/2017/05/Lehdist%C3%B6tiedote-5.5.2017.pdf> Viitattu 1.8.2017

[42] FIMAtec youtube video https://www.youtube.com/watch?v=f_5TcUB8Sto Viitattu 1.8.2017

[44] D-Shape <http://d-shape.com/> Viitattu 1.8.2017

[45] D-Shape <http://d-shape.com/projects/> Viitattu 1.8.2017

[46] Emerging objects 2017 <http://www.emergingobjects.com/portfolio/> Viitattu 1.8.2017

[47] Emerging objects 2017 <http://www.emergingobjects.com/about/> Viitattu 1.8.2017

- [48] archdaily.com <http://www.archdaily.com/613171/emerging-objects-creates-bloom-pavilion-from-3-d-printed-cement> Viitattu 1.8.2017
- [49] IAAC <https://iaac.net/research-projects/large-scale-3d-printing/mini-builders/> Viitattu 1.8.2017
- [50] IAAC <https://iaac.net/research-projects/large-scale-3d-printing/3d-printed-bridge/> Viitattu 1.8.2017
- [51] archdaily.com <http://www.archdaily.com/804596/worlds-first-3d-printed-bridge-opens-in-spain> Viitattu 1.8.2017
- [52] Clément Dutoit, IUT de Béthune, Final project: “The 3D Printing in Civil Engineering”
- [53] Dennis de Witte (2015) Master (MSc) thesis, Concrete in an AM process - Freeform concrete processing, Delft University of Technology
- [54] MX3D <http://mx3d.com/> Viitattu 17.8.2017
- [55] MX3D <http://mx3d.com/projects/metal/> Viitattu 17.8.2017
- [56] MX3D <http://mx3d.com/projects/bridge/> Viitattu 17.8.2017
- [57] Arup 2015 <http://research.arup.com/projects/additive-manufacturing-bringing-3d-printing-to-hard-hat-construction/> Viitattu 17.8.2017
- [58] globalconstructionreview.com <http://www.globalconstructionreview.com/innovation/arup-pioneers-3d-printing-structural-steel-nodes/> Viitattu 17.8.2017
- [59] globalconstructionreview.com <http://www.globalconstructionreview.com/innovation/3d-printed-component-pr5o6ven-c8ar0ry-sa2me-4loa8d/> Viitattu 17.8.2017
- [60] inhabitat.com <http://inhabitat.com/british-architect-designs-first-3d-printed-element-for-use-in-the-construction-industry/> Viitattu 17.8.2017
- [61] 3ders.org <http://www.3ders.org/articles/20150606-american-standard-announces-innovative-new-metal-3d-printed-faucet-designs.html> Viitattu 17.8.2017
- [62] Holger Strauß (2013) AM Envelope - The potential of Additive Manufacturing for façade construction, Delft University of Technology, Faculty of Architecture

[63] NCCR Digital Fabrication <http://www.dfab.ch/portfolio/in-situ-fabricator/> Viitattu 17.8.2017

[64] NCCR Digital Fabrication youtube video 2017 <https://www.youtube.com/watch?v=TCJOQkOE69s> Viitattu 17.8.2017

[65] phys.org <https://phys.org/news/2017-02-digital-fabrication-architecture.html> Viitattu 17.8.2017

[66] designboom.com <http://www.designboom.com/technology/eth-zurich-dfab-house-robots-3d-printers-06-30-2017/> Viitattu 17.8.2017

[67] Branch technology 2015 http://www.branch.technology/#cfab_title Viitattu 22.8.2017

[68] asme.org <https://www.asme.org/engineering-topics/articles/manufacturing-design/3d-printer%E2%80%99s-twist-may-shape-homebuilding> Viitattu 22.8.2017

[69] dezeen.com <https://www.dezeen.com/2017/04/12/icd-itke-research-pavilion-university-stuttgart-germany-carbon-fibre-robots-drones/> Viitattu 22.8.2017

[70] designboom.com <https://www.designboom.com/architecture/vulcan-beijing-design-week-bjdwl-largest-3d-printed-architectural-pavilion-parkview-green-10-07-2015/> Viitattu 22.8.2017

[71] archdaily.com <http://www.archdaily.com/772241/this-3d-printed-pavilion-provides-shade-during-the-day-and-illuminates-at-night> Viitattu 22.8.2017

[72] archdaily.com <http://www.archdaily.com/794855/urban-cabin-dus-architects> Viitattu 22.8.2017

[73] 3D-printed canal house project <http://3dprintcanalhouse.com/> Viitattu 22.8.2017

[74] Wasproject 2016 <http://www.wasproject.it/w/en/il-muro-di-terra-e-paglia-alle-soglie-dei-3-metri/> Viitattu 1.9.2017

[75] Wasproject <http://www.wasproject.it/w/en/about-us/> Viitattu 1.9.2017

[76] IAAC <https://iaac.net/research-projects/large-scale-3d-printing/pylos/> Viitattu 1.9.2017

- [77] IAAC <https://iaac.net/research-projects/large-scale-3d-printing/terra-performa/> Viitattu 1.9.2017
- [78] designboom.com <https://www.designboom.com/architecture/digital-grotesque-full-scale-3d-printed-room-realized/> Viitattu 1.9.2017
- [79] Voxeljet <https://www.voxeljet.com/industries/foundries/entirely-3d-printed-room/> Viitattu 1.9.2017
- [80] 3dprint.com <https://3dprint.com/41447/3d-printed-cool-brick/> Viitattu 1.9.2017
- [81] data-clay.org <http://www.data-clay.org/projects/Building%20Bytes/> Viitattu 1.9.2017
- [82] 3dprinterworld.com <http://www.3dprinterworld.com/article/brick-by-brick-how-3d-printing-can-revolutionize-construction> Viitattu 1.9.2017
- [83] National Science Foundation 2016 youtube video <https://www.youtube.com/watch?v=MVWayhNpHr0> Viitattu 1.9.2017
- [84] dailymail.com.uk <http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-4352794/Robot-build-walls-six-times-faster-humans.html> Viitattu 1.9.2017
- [85] construction-robotics.com <http://www.construction-robotics.com/sam100/> Viitattu 1.9.2017
- [86] Fast robotics 2016 youtube video <https://www.youtube.com/watch?v=4YcrO8ONcfY> Viitattu 1.9.2017
- [87] Fast robotics 2016 youtube video <https://www.youtube.com/watch?v=5bW1vuCgEaA> Viitattu 1.9.2017
- [88] Fast robotics 2016 <https://www.fbr.com.au/> Viitattu 1.9.2017
- [89] Voxeljet <https://www.voxeljet.com/industries/foundries/casting-of-concrete/> Viitattu 24.8.2017
- [90] 3dcreative.lt <http://3dcreative.lt/3d-printing-services/concrete-and-ceramic-casting-molds/?lang=en> Viitattu 24.8.2017
- [91] archdaily.com <http://www.archdaily.com/613197/construction-of-sagrada-familia-accelerated-by-3-d-printing-technology> Viitattu 24.8.2017

[92] Apis Cor youtube video 2016 <https://www.youtube.com/watch?v=wSRmggwm1Us> Viitattu 24.8.2017

[93] archdaily.com <http://www.archdaily.com/806230/this-complex-concrete-column-was-made-using-3d-printed-formwork> Viitattu 24.8.2017

[94] Look up London 2016 <https://lookup.london/crossrail-tottenham-court-road/> Viitattu 24.8.2017

[95] 3dprintingindustry.com <https://3dprintingindustry.com/news/3d-printing-helps-bring-underground-crossrail-london-118885/> Viitattu 24.8.2017

[96] Freefab 2017 <http://www.freefab.com/> Viitattu 24.8.2017

[97] archdaily.com/ <http://www.archdaily.com/613197/construction-of-sagrada-familia-accelerated-by-3-d-printing-technology> Viitattu 25.8.2017

[98] Stratasys <http://www.stratasys.com/industries/architecture> Viitattu 25.8.2017

[99] Ultimaker <https://ultimaker.com/en/explore/where-is-3d-printing-used/architecture> Viitattu 25.8.2017

[100] 3der.org <http://www.3ders.org/articles/20160427-25-of-dubais-buildings-to-be-3d-printed-by-2030-dubai-ruler-sheikh-mohammed-announces.html>. Viitattu 6.9.2017

[101] 3der.org <http://www.3ders.org/articles/20160802-saudi-arabia-plans-to-3d-print-15-million-houses-with-winsuns-construction-3d-printing-tech.html>. Viitattu 6.9.2017

[102] tctmagazine.com <https://www.tctmagazine.com/3d-printing-news/experts-3d-printing-disrupt-european-construction-five-years/> Viitattu 6.9.2017

[103] archdaily.com <http://www.archdaily.com/472905/bricks-grown-from-bacteria> Viitattu 6.9.2017

[104] materia.nl, viitattu 6.9.2017: <https://materia.nl/article/3d-printed-structure-bamboo-reinforced-compounds/>

[105] Composites Manufacturing Magazine, viitattu 6.9.2017: <http://compositesmanufacturingmagazine.com/2016/07/oak-ridge-national-lab-3d-prints-table-composite-bamboo-fiber/>

[106] Thermwood, viitattu 15.9.2017: <http://blog.thermwood.com/topic/3d-printing>

[107] Wohlers Associates: Wohler's Report 2017, Annual Worldwide Progress Report

[108] 3dprintedbuilding.eu <http://3dprintedbuilding.eu/> Viitattu 19.9.2017

[109] Materialise <https://i.materialise.com/blog/sagalassos/> Viitattu 19.9.2017

[110] Willmann, Knauss, Bonwetschb, Apolinarska, Gramazio, Kohler (2015) Robotic timber construction - Expanding additive fabrication to new dimensions. Sveitsi: ETH Zurich

[111] Xia, Sanjayan (2016) Method of formulating geopolymers for 3D printing for construction applications. Australia: Swinburne University of Technology

[112] Kazemian, Yuan, Cochran, Khoshnevis (2017) Cementitious materials for construction-scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing mixture. Los Angeles, USA: University of Southern California

[113] Voxeljet AG, Concrete Casting with 3D printed sand molds

[114] Rodrigo Aguirre, IAAC, Bringing 3d printing to the architectural scale, 3D-Step Future Construction Workshop 5.10.2016.

[115] Oak Ridge National Laboratory, 3D printed tool for building aircraft achieves Guinness World Records title, <https://www.ornl.gov/news/3d-printed-tool-building-aircraft-achieves-guinness-world-records-title> Viitattu 19.9.2017

[116] TU/e, World's first 3D printed reinforced concrete bridge opened, <https://www.tue.nl/en/university/news-and-press/news/17-10-2017-worlds-first-3d-printed-reinforced-concrete-bridge-opened/> Viitattu 2.11.2017

10.1 Kuvalähteet

(1) <https://www.lesimprimantes3d.fr/wp-content/uploads/2014/06/robot-imprimante-3d-minibuilder-chauffage.jpg>

(2) http://www.hizook.com/files/users/3/clay_3D_printer_3.jpg

(3-4) Willmann, Knauss, Bonwetschb, Apolinarska, Gramazio, Kohler (2015) Robotic timber construction - Expanding additive fabrication to new dimensions. Sveitsi: ETH Zurich

(5) https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/1/1b/Gleitschalung_Monobox_Bitschnau.jpg/220px-Gleitschalung_Monobox_Bitschnau.jpg

(6) https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/f/f9/Curb_pour_for_Poinciana_Parkway.jpg/640px-Curb_pour_for_Poinciana_Parkway.jpg

(7) <http://www.3ders.org/images2014/world-first-3d-printed-concrete-castle-21.jpg>

(8) <http://www.realestate.com.au/blog/wp-content/uploads/2014/01/concreteprint.jpg>

(9) http://www.biomimetic-architecture.com/wordpress/wp-content/uploads/2012/04/dshape3_edit.jpg

(10) <http://www.arch2o.com/wp-content/uploads/2016/01/Arch2o-Amalgamma-7-07.jpg>

(11) <http://www.arch2o.com/wp-content/uploads/2016/01/Arch2o-Amalgamma-1-01.jpg>

(12) http://www.dfab.ch/wp-content/uploads/2017/04/140110_134_Square-Column_EL_010_WL.jpg

(13) Voxeljet AG, Concrete Casting with 3D printed sand molds

(14) <http://www.costruire3d.com/wp-content/uploads/2013/12/3D-house-printer-Contour-Crafting-1-436x272.jpg>

(15) http://media.treehugger.com/assets/images/2015/10/apis-cor.jpg.600x315_q90_crop-smart.jpg

(16) https://c1.staticflickr.com/8/7674/26587585494_65a3209e95_b.jpg

(17) http://www.okorder.com/p/ar-glass-12mm-chopped-strands-for-glass-fiber-reinforced-concrete-grc_215477.html

(18) <http://www.rudus.fi/tuotteet/betoni/kuitubetonit/5799/teraskuitubetonit>

- (19) <http://www.rudus.fi/tuotteet/betoni/kuitubetonit/5801/mikrokuitubetonit>
- (20) <http://www.rudus.fi/tuotteet/betoni/kuitubetonit/5800/makrokuitubetonit>
- (21) Voxeljet AG, Concrete Casting with 3D printed sand molds
- (22) <http://blogs.qub.ac.uk/geopolymer/files/2012/11/Range-of-geopolymer-concrete-and-ordinary-concrete.jpg>
- (23) https://all3dp.com/app/uploads/2017/03/geop_2.jpg
- (24) <http://www.orgprint.com/db/images/3d-pechat/stroitelnye-3d-printery-8.png>
- (25) <https://www.architetturaecosostenibile.it/architettura/criteri-progettuali/stampante-3d-costruisce-casa-886/>
- (26) <https://www.architetturaecosostenibile.it/images/stories/2014/case-3d-cina-a.jpg>
- (27) <http://all3dp.com/wp-content/uploads/2015/04/china-3d-printed-mansion-and-tower-block-photo-5.jpg>
- (28) <http://markom.watoc.org/wp-content/uploads/2015/01/3D-vila-4-blog-Don-Marko-M.jpg>
- (29) https://futurism.com/wp-content/uploads/2016/05/moham-med_A-600x315.jpg
- (30) <https://all3dp.com/app/uploads/2017/03/Apis-Cor-3D-Printing-Construction-1020x610.jpg>
- (31) https://all3dp.com/app/uploads/2017/03/ApisCor_febr_03.jpg
- (32) http://www.esaimaa.fi/f/a/ab/panorama_22220285.png
- (33) <http://fablabmaastricht.nl/sites/default/files/images/geprint%20huis.jpeg>
- (34) <http://www.d-shape.com/wp-content/uploads/2014/12/Rygo.jpg>
- (35) http://foxlin.com/wp-content/uploads/sites/149/2012/04/dshape1_edit.jpg

- (36) <http://www.emergingobjects.com/wp-content/uploads/2015/03/Bloom1.jpg>
- (37) http://www.emergingobjects.com/wp-content/uploads/2014/05/quake_column3.jpg
- (38) http://www.emergingobjects.com/wp-content/uploads/2011/12/SeatS_lug1_LR1.jpg
- (39) https://iaac.net/wp-content/uploads/2017/03/IMG_7165-1024x718.jpg
- (40) http://robohub.org/wp-content/uploads/2015/05/Minibuilders_IAAC.jpeg
- (41) <http://assets.inhabitat.com/wp-content/blogs.dir/1/files/2014/06/IAAC-Minibuilders-7.jpg>
- (42) <https://all3dp.com/app/uploads/2016/12/3d-printed-bridge-2.jpg>
- (43) Clément Dutoit, IUT de Béthune, Final project: “The 3D Printing in Civil Engineering”
- (44) <http://www.designbuild-network.com/projects/litracon/images/2-translucent-effect.jpg>
- (45) <http://mx3d.com/wp-content/uploads/2015/05/Front-1500x630.jpg>
- (46) http://www.harbec.com/wp-content/uploads/2014/08/img_3141__660x445.jpg
- (47) <http://www.archdaily.com/642329/mx3d-to-3d-print-a-bridge-in-mid-air-over-amsterdam-canal>
- (48) http://www.globalconstructionreview.com/client_media/images/x846.arup_printed_node.jpg.pagespeed.ic.WntofUBIWJ.jpg
- (49) <http://assets.inhabitat.com/wp-content/blogs.dir/1/files/2013/12/Adrian-Priestman-3D-Printing-Bevis-Marks-1.jpg>
- (50) <http://www.3ders.org/images2015/american-standard-announces-innovative-new-metal-3d-printed-faucet-designs4.jpg>
- (51–52) Holger Strauß (2013) AM Envelope - The potential of Additive Manufacturing for façade construction, Delft University of Technology, Faculty of Architecture

- (53) <https://www.designboom.com/wp-content/uploads/2017/06/eth-zurich-building-robots-3D-printers-designboom-05.jpg>
- (54) <http://www.3ders.org/images2016/branch-technology-begin-construction-3dprinted-house-july-3.jpg>
- (55) <https://3dprintingindustry.com/wp-content/uploads/2017/01/branch-tech2.png>
- (56) https://static.dezeen.com/uploads/2017/04/icd-itke-research-pavilion-2016-2017-architecture-stuttgart-germany-_dezeen_2364_col_3.jpg
- (57) <http://www.archdaily.com/776169/lcds-vulcan-awarded-guinness-world-record-for-largest-3d-printed-structure>
- (58) <http://www.archdaily.com/772241/this-3d-printed-pavilion-provides-shade-during-the-day-and-illuminates-at-night>
- (59) <http://www.archdaily.com/794855/urban-cabin-dus-architects>
- (60) <https://materia.nl/article/3d-printed-structure-bamboo-reinforced-compounds/>
- (61) <http://compositesmanufacturingmagazine.com/2016/07/oak-ridge-national-lab-3d-prints-table-composite-bamboo-fiber/>
- (62) <http://www.thermwood.com/>
- (63) <http://www.wasproject.it/w/wp-content/uploads/2016/08/Schermata-2016-08-08-alle-10.38.58.png>
- (64) <https://iaac.net/wp-content/uploads/2017/03/01-Overview-1024x681.jpg>
- (65) https://static.dezeen.com/uploads/2012/08/dezeen_Stone-Spray-Robot-by-Anna-Kulik-Inder-Shergill-and-Petr-Novikov_2.jpg
- (66) <http://www.designboom.com/wp-content/uploads/2013/09/3D-printed-room-by-michael-hansmeyer-designboom-01.jpg>
- (67) <http://www.emergingobjects.com/wp-content/uploads/2013/09/hive01.jpg>
- (68) <https://3dprint.com/wp-content/uploads/2015/02/coolbrick4.jpg>

- (69) <http://www.data-clay.org/projects/Building%20Bytes/images/sequence/Brian-Peters-BuildingBytes-DigitalCeramics-DataClay-10.jpg>
- (70) <http://ceramics.org/wp-content/uploads/2016/03/0309ctt-brick-robot-lo-res-600x350.jpg>
- (71) https://farm9.static.flickr.com/8051/28349557832_601e84a560.jpg
- (72) <http://www.3ders.org/images2017/bricklaying-3d-printer-company-fastbrick-robotics-partners-caterpillar-further-develop-tech-2.jpg>
- (73) https://d2j21x2d72g5zn.cloudfront.net/styles/medium_906x604/public/Hadrian-X-artists-1440.jpg?itok=k4VvS_1Z
- (74) Voxeljet AG, Concrete Casting with 3D printed sand molds
- (75) http://3dcreative.lt/wp-content/uploads/2015/05/6.Gegossene_Form_.jpg
- (76) <http://www.3dprinterworld.com/sites/speh/files/images/voxeljet/philippe-morel-3d-printing-in-concrete.jpg>
- (77-79) Voxeljet AG, Concrete Casting with 3D printed sand molds
- (80) http://apis-cor.com/img/Media/ApisCor_op4.jpg
- (81) <http://www.archdaily.com/806230/this-complex-concrete-column-was-made-using-3d-printed-formwork>
- (82) http://www.xtreee.eu/wp-content/uploads/2017/01/FBC_8158-%C2%A9-Lisa-Ricciotti_Redim.png
- (83) http://www.freefab.com/images/imin2_new.png
- (84) <https://lookup.london/wp-content/uploads/2016/10/Photo-17-09-2016-14-07-15-819x1024.jpg>
- (85–86) LIVA-hanke/Sami Lampinen 25.9.2017
- (87) <https://www.ornl.gov/news/3d-printed-tool-building-aircraft-achieves-guinness-world-records-title>
- (88) <https://i.materialise.com/blog/wp-content/uploads/2015/03/print1.jpg>
- (89) LIVA-hanke/Sami Lampinen 16.9.2017

(90) LIVA-hanke/Sami Lampinen 25.9.2017

(91) http://usglobalimages.stratasys.com/en/Resources/Case%20Studies/Architecture/Rietveld%20Architects/ModelBuilding_Header_427.jpg?v=635659704033008082

(92) http://usglobalimages.stratasys.com/en/Resources/Case%20Studies/Architecture/Modelzium/modelzium_3d_printed_architectural_model_main.jpg?v=635659704010555764

(93) <https://i.materialise.com/blog/sagalassos/>

(94) <http://lixpen.com/blog/category/3d-printing-pen-2/>

(95) <https://3dprint.com/wp-content/uploads/2016/05/wobbleworks-3doodler-create-3d-printing-pen-5.jpg>

(96) <https://www.designboom.com/wp-content/uploads/2013/09/3D-printed-room-by-michael-hansmeyer-designboom-03.jpg?x72848>

(97) http://www.xtreee.eu/wp-content/uploads/2016/10/IMG_9739.jpg

(98) <http://3dprintedbuilding.eu/eerste-3d-geprinte-gebouw-europa-laatzich-zien/>



SAVONIA

LISÄÄVÄN VALMISTUKSEN KÄYTTÖ RAKENNUSALALLA

TILANNEKATSAUS 2017

Lisäävä valmistus (Additive Manufacturing, AM), eli 3D-tulostus on valmistusmenetelmä, jonka käyttö yleistyy nopeasti eri teollisuudenaloilla. Tällä hetkellä näkyvimmin lisäävää valmistusta hyödyntäviä aloja ovat ilmailu- ja avaruusala, autoteollisuus sekä terveydenhuolto. Toistaiseksi valmistusmenetelmän hyödyntäminen rakennusteollisuudessa on ollut muita teollisuudenaloja hitaampaa ja vähemmän näkyvää, mutta tilanne on muuttumassa.

3D-tulostamisen puhutaan usein olevan osa teollisuuden neljättä vallankumousta, joka tulee muuttamaan perinteistä teollisuutta monilta osin. Rakennusteollisuus ei ole tästä poikkeus, ja viime vuosina julkisuuteen on alkanut ilmaantua esimerkkejä siitä, miten lisäävä valmistus voi toimintoja tehostaa.

Voiko rakennuksia tai sen osia 3D-tulostaa?

Kysymys on askarruttanut rakentamisen asiantuntijoita valmistusmenetelmän yleistymisestä lähtien. Rakennusteollisuudessa arkkitehdit ovat käyttäneet lisäävää valmistusta hyödyksi pienoismallien valmistuksessa jo vuosia, mutta rajoittavana tekijänä on ollut mm. tulostusalueen koko. Viimeisen vuosikymmenen aikana valmistusmenetelmä on kehittynyt monelta osin: mm. metallin 3D-tulostus on yleistynyt, eri materiaaleja käyttävien tulostuslaitteiden koko on kasvanut ja tarjolle on tullut lukuisa määrä erilaisia komposiittimateriaaleja. Markkinoille on tullut myös useita betonin 3D-tulostukseen erikoistuneita yrityksiä.

Tässä julkaisussa luodaan yleiskuva lisäävän valmistuksen sovelluksista, käyttökohteista ja materiaaleista rakennusallalla. Julkaisussa selvitetään nykyistä tilannetta valmistusmenetelmän käytöstä maailmalla ja Suomessa, sekä pohditaan lisäävän valmistuksen tulevaisuuden näkymiä rakennusallalla.



Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

Vipuvoimaa

EU:lta
2014–2020

Pohjois-Savon liitto tukee

maakunnan
menestystä

